

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. В. Поплавский

ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

*Утверждено
Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебника для студентов учреждений высшего образования
по специальности «Физико-химические методы
и приборы контроля качества продукции»*

Минск 2014

УДК 53.08(075.8)
ББК 22.3я73
П57

Р е ц е н з е н т ы :

кафедра «Информационно-измерительная техника и технология»
Белорусского национального технического университета
(заведующий кафедрой доктор физико-математических наук,
профессор *И. Е. Зуйков*);
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор физико-математических
наук, профессор, заведующий кафедрой физической электроники
и нанотехнологии Белорусского государственного университета
Ф. Ф. Комаров

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Поплавский, В. В.

П57 Измерение физических величин : учебник для студентов специальности «Физико-химические методы и приборы контроля качества продукции» / В. В. Поплавский. – Минск : БГТУ, 2014. – 441 с.
ISBN 978-985-530-265-1.

Систематически изложены основы процесса измерения физических величин, преобразования сигналов измерительной информации, определения характеристик средств измерений, согласования измерительных преобразователей, входящих в их состав. Рассмотрены принципы измерительных преобразований с применением электромагнитного, корпускулярного и акустического излучений и основные физико-химические методы измерения состава веществ, базирующиеся на применении излучений. Изложена методика определения характеристик средств измерений и обработки экспериментальных данных, получаемых при измерении состава веществ современными аналитическими методами. Предложены оригинальные контрольные задания по основным разделам дисциплины.

УДК 53.08(075.8)
ББК 22.3я73

ISBN 978-985-530-265-1

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2014
© Поплавский В. В., 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник написан применительно к программе дисциплины «Измерение физических величин» для студентов специальности «Физико-химические методы и приборы контроля качества продукции». Подготовка специалистов в области применения аналитических методов и соответствующего оборудования для контроля качества продукции требует формирования знаний как об общих закономерностях процесса измерений, так и о конкретных методах анализа состава веществ и их свойств. Содержание дисциплины составляют принципы и наиболее общие методы измерений физических величин, применяемые в различных отраслях измерительной техники.

В комплексе быстроразвивающихся дисциплин, посвященных методам измерений, курс «Измерение физических величин» является основополагающим. Контроль качества промышленных и продовольственных товаров, а также фармацевтической продукции требует освоения методов измерения широкого круга физических величин. Для измерения каждой из них разработаны и применяются различные методы и средства измерений; причем одна и та же величина может измеряться несколькими совершенно разными методами и средствами. Кроме того, в процессе контроля качества продукции важное место занимает определение состава анализируемых веществ. В этой связи в программу дисциплины и в учебник включен материал, излагающий сущность современных методов измерения состава веществ, реализуемых с применением излучений, которые не рассматриваются при изучении других дисциплин специальности.

Цель изучения дисциплины – создание теоретической основы для освоения студентами методов измерений и принципов действия измерительной техники.

Задачами преподавания дисциплины являются:

- формирование общих представлений о преобразовании физических величин в измерительных устройствах различного назначения;
- обучение методам физико-математического моделирования измерительных устройств и определения их статических и динамических характеристик;
- изучение принципов работы базовых измерительных преобразователей и устройств для измерения основных физических величин;

• изучение современных методов измерения состава веществ, основанных на применении электромагнитного, корпускулярного и акустического излучений.

В соответствии с образовательным стандартом специальности «Физико-химические методы и приборы контроля качества продукции» специалист должен:

• знать: теоретические основы и принципы действия измерительных преобразователей различного назначения; смысл обобщенных статических и динамических характеристик измерительных преобразователей и средств измерений; теоретические основы и принципы измерений состава веществ с применением электромагнитного, корпускулярного и акустического излучений.

• уметь: формулировать и строить физико-математические модели измерительных преобразователей и средств измерений; анализировать последовательность преобразования сигналов измерительной информации в средствах измерений; определять статические и динамические характеристики средств измерений; планировать измерения современными аналитическими методами, основанными на применении излучений, обрабатывать и анализировать получаемую измерительную информацию.

В первой части учебника систематически изложены основы процесса измерений физических величин, преобразования сигналов измерительной информации, физико-математического моделирования измерительных устройств, определения статических и динамических характеристик средств измерений, согласования измерительных преобразователей, входящих в их состав.

Вторая часть посвящена изложению теоретических основ и принципов измерения состава веществ современными аналитическими методами, основанными на применении электромагнитного, корпускулярного и акустического излучений. Рассматриваются природа, основные свойства, характеристики и принципы преобразований каждого из видов излучений. Дано описание основных аналитических методов измерений состава веществ с применением излучений; изложены физические и физико-химические процессы взаимодействия излучений с веществом, лежащие в основе каждого из методов, способы обработки и анализа получаемой измерительной информации.

В третью часть включены методика и примеры выполнения практических заданий по основным разделам дисциплины, а также многовариантные контрольные задания, выполнение которых призвано обеспечить более глубокое понимание теоретического материала и приобретение навыков его практического применения. При изложении методики построения физико-математических моделей и определения характери-

стик средств измерений использован подход, содержащийся в пособиях: Харт Х. Введение в измерительную технику [1]; Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью [22]. Методики определения характеристик спектральных приборов и измерений состава веществ рассматриваемыми аналитическими методами представлены оригинальными примерами. Также оригинальными являются предлагаемые к выполнению контрольные задания. Большой набор заданий по всем разделам позволяет обеспечить их индивидуальное выполнение каждым студентом учебной группы.

Дисциплина «Измерение физических величин» базируется главным образом на знаниях, полученных при изучении курсов химии и физики, и в то же время является основой при усвоении ряда дисциплин специализации, посвященных методам анализа и контроля качества продукции. Рассматриваемые современные методы измерений состава веществ, реализуемые с применением излучений, существенно дополняют учебный материал специальности.

Часть 1. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЙ

ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1.1. Предмет и базовые понятия дисциплины

1.1.1. Базовые понятия

Измерение физических величин – дисциплина, предмет которой составляют детальные представления о принципах измерений, а также общие представления о средствах и методах измерений.

Измерение – последовательность экспериментальных и вычислительных операций, осуществляемых с целью нахождения значения физической величины, характеризующей некоторый объект или явление. В процессе измерения неизвестное значение измеряемой величины сравнивают с однородной величиной, принятой за единицу измерения, и определяют, какое число раз эта единица содержится в измеряемой величине. Измерение завершается определением степени приближения найденного значения к истинному значению измеряемой величины.

Физическая величина – свойство, общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта.

Например, масса – мера инертности и гравитационного взаимодействия любых материальных объектов, но значение массы каждого из макроскопических тел в общем случае различно. При этом инертность есть качественное свойство массы, а значение массы – количественное.

Значение физической величины – оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Истинное значение физической величины – значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношении соответствующие свойства объекта. Результат измерения дает только оценку истинного значения физической величины с некоторой погрешностью.

Действительное значение физической величины – значение физической величины, найденное экспериментальным путем и приближающееся к истинному значению настолько, что для данной цели может быть использовано вместо него.

Под измеренным значением физической величины понимают то значение, которое получается в результате отсчета по индикаторному устройству средства измерения.

Сигнал измерительной информации – сигнал, функционально связанный с измеряемой физической величиной.

Поскольку у любого физического объекта имеется бесконечно большое количество свойств, то любая классификация физических величин, отображающих эти свойства, объединяет лишь малую часть свойств объекта.

В частности, измеряемые величины классифицируют по группам свойств, отображаемых ими в процессе измерения, на химические и физические. Физические величины, в свою очередь, можно подразделить на механические, акустические, электрические, магнитные, оптические и др.

По отношению к процессу измерения и сигналам измерительной информации физические величины можно подразделить на активные и пассивные.

Активными являются величины, которые могут быть преобразованы в сигнал измерительной информации без использования вспомогательных источников энергии. Такими величинами являются механическая сила, температура, сила электрического тока, электрическое напряжение и др.

Для измерения пассивных величин (масса, электрические сопротивление, емкость, индуктивность и др.) необходимо использовать вспомогательный источник энергии, с помощью которого создается сигнал измерительной информации. При этом измеряемые пассивные величины преобразуются в активные, которые собственно и измеряются. Так, при измерении массы тела фактически сравнивают пропорциональную этой массе силу, действующую на тело в гравитационном поле Земли, с известной силой. Для измерения сопротивления, емкости или индуктивности через электрическую цепь, содержащую эти элементы, пропускают от дополнительного источника ток и измеряют силу тока и напряжение, функционально связанные с измеряемым параметром элемента цепи.

По признаку аддитивности физические величины подразделяются на аддитивные (экстенсивные) и неаддитивные (интенсивные).

Аддитивной называется физическая величина, разные значения которой могут быть суммированы, умножены на числовой коэффициент, разделены друг на друга. Аддитивные величины обычно являются физическими или энергетическими свойствами объекта. К аддитивным величинам, например, относятся длина, масса, сила, интервалы времени,

скорость, сила тока, электродвижущая сила (ЭДС) и др. Такие величины можно измерять по частям, а также точно воспроизводить с помощью многозначной меры, основанной на суммировании размеров отдельных мер. Так, масса объекта равна сумме масс составляющих его частей, токи суммируются при соединении нескольких проводников в узел, сопротивления при последовательном, а проводимости резисторов и трубопроводов при параллельном их соединении.

Неаддитивные величины, например плотность, вязкость, удельная электропроводность, магнитная восприимчивость, не измеряются прямо, а преобразуются в непосредственно измеряемые величины или измеряются косвенно. Воспроизведение неаддитивных величин затруднено вследствие сложности создания высокоточных эталонов и мер таких величин. Физические величины, характеризующие свойства веществ и материалов, лучше всего воспроизводятся с помощью стандартных образцов.

Физические величины разделяются также на постоянные величины и величины, изменяющиеся во времени. Постоянная физическая величина – величина, значение которой можно считать постоянным за время, превышающее длительность измерения. Переменной является та физическая величина, значение которой изменяется в процессе измерения.

1.1.2. Единицы измерения физических величин

Найденное значение измеряемой величины представляет собой произведение числового значения на единицу измерения данной величины. Например, сила тока $I = 0,5 \text{ A} = 500 \text{ mA}$. В общем виде результат измерения представляется следующим образом:

$$G = \{G\} [G], \quad (1.1)$$

где G – измеренное значение физической величины; $\{G\}$ – ее числовое значение; $[G]$ – единица измерения. Выражение (1.1) называют основным уравнением измерений.

Единица физической величины – физическая величина фиксированного размера, которой по определению присвоено стандартное числовое значение, равное единице.

Система физических величин – совокупность физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимают за независимые, а другие определяют как функции этих независимых величин.

В прил. 1 приведены наименования, обозначения и определения основных единиц Международной системы СИ (SI), принятой на 11-й Гене-

ральной конференции по мерам и весам в 1960 г. и уточненной на последующих конференциях.

Первые три единицы (метр, килограмм, секунда) позволяют образовывать согласованные производные единицы для всех величин, имеющих механическую природу. Остальные добавлены для образования производных единиц измерения величин, не сводимых к механическим: ампер – для электрических и магнитных величин, кельвин – для тепловых, кандэла – для световых, моль – для величин в области молекулярной физики и химии.

Каждой физической величине (за исключением безразмерных величин) соответствует своя размерность, обозначаемая определенной заглавной буквой, а именно: L – длина, M – масса, T – время, I – сила тока, Θ – термодинамическая температура, N – количество вещества, J – сила света.

Размерность измеряемой физической величины – выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин в различных степенях, отражающее связь данной величины с физическими величинами, принятыми в системе величин за основные, с коэффициентом пропорциональности, равным 1.

Размерность любой производной величины можно записать в соответствии с символьными обозначениями основных величин. Например, размерность скорости: $\dim v = LT^{-1}$; размерность силы $\dim F = LMT^{-2}$. Символ \dim является, согласно международному стандарту ИСО 31/0, обозначением размерности величины. Символ $[G]$ является обозначением единицы измерения (см. уравнение (1.1)). Например, $[v] = \text{м/с}$ – единица измерения скорости.

Единицы СИ, предназначенные для измерения плоского (радиан) и телесного (стерадиан) углов и образования единиц величин, связанных с этими углами, в соответствии с их определением (см. прил. 1) не имеют размерностей.

Значение телесного угла можно рассчитать по формуле

$$\Omega = 2\pi \left[1 - \cos \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right] = 4\pi \sin^2 \left(\frac{\varphi}{4} \right), \quad (1.2)$$

где Ω – телесный угол (ср); φ – плоский угол (рад) при вершине конуса, образованного внутри сферы данным телесным углом.

На практике часто используются внесистемные единицы измерения плоских углов: градус ($^\circ$), минута ($'$) и секунда ($''$).

В прил. 2 приведены некоторые производные единицы СИ, имеющие собственные наименования, а в прил. 3 – внесистемные единицы, допущенные к применению в специальных областях. Прил. 4 содержит использовавшиеся ранее единицы измерения ряда физических величин, которые

не рекомендованы к применению, однако могут встречаться в научно-технической литературе. Наименования десятичных кратных и дольных единиц образуются при помощи специальных приставок, которые приведены в прил. 5.

Различают прямые и косвенные измерения. При прямом измерении результат получается непосредственно из измерения самой величины (например, измерение длины предмета линейкой или его массы путем взвешивания). Однако прямые измерения не всегда возможны или недостаточно точны. В этих случаях прибегают к косвенным измерениям, при которых искомое значение измеряемой величины находят (рассчитывают) по известной зависимости между ней и непосредственно измеряемыми величинами.

Всякое измерение неизбежно связано с погрешностями. В зависимости от источников погрешностей измерений различают методические погрешности, порожденные несовершенством метода измерения, и инструментальные погрешности, обусловленные несовершенством технических средств, используемых при измерениях.

По характеру проявления различают систематические погрешности, изменяющиеся закономерно или остающиеся неизменными при измерении, и случайные погрешности, изменяющиеся случайным образом. Случайные погрешности оценивают по данным многократных наблюдений методами математической статистики. При измерении величин, изменяющихся во времени, проявляются погрешности, обусловленные инерционностью применяемых средств измерения. В области микромира предел достижимой точности измерений обусловлен соотношением неопределенностей. Оценку погрешности измерения выражают в единицах измеряемой величины (абсолютная погрешность) или в относительных единицах (относительная погрешность). При окончательной записи результата измерения к измеренному значению, записанному в соответствии с (1.1), добавляются значения абсолютной и относительной погрешностей измерения.

1.1.3. Методы измерений

Метод измерений – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений.

Принцип измерений – совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

По признакам (способам) сравнения физической величины с единицей, воспроизводимой соответствующей мерой, прямые методы измерений подразделяются на методы непосредственного отображения и методы сравнения.

В методах непосредственного отображения численное значение измеряемой физической величины определяют непосредственно по показанию измерительного прибора (например, измерение длины линейкой, напряжения – вольтметром, силы тока – амперметром). В методах сравнения измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой соответствующей мерой.

Измерение методом непосредственной оценки позволяет получать быструю оперативную информацию о значении измеряемой величины, но характеризуется ограниченной точностью. Измерения методами сравнения обеспечивают большую точность.

Методы сравнения измеряемой величины с мерой подразделяются на следующие виды:

- нулевой метод, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводится до нуля;
- метод замещения, в котором действие измеряемой величины замещается действием меры с известным значением ее величины;
- метод дополнения, в котором значение измеряемой величины дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее заданному значению;
- дифференциальный метод, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и регистрируется разность между измеряемой величиной и близкой ей по значению известной эталонной величиной.

Дифференциальный метод сравнения используется в тех случаях, когда практическое значение имеет отклонение измеряемой величины от некоторого номинального значения (например, отклонение напряжения, уход частоты).

Наибольшую точность измерений обеспечивает нулевой метод сравнения. Его разновидностями являются:

- компенсационный метод, при котором действие измеряемой величины компенсируется действием величины образцовой;
- мостовой метод, при котором достигается уравнивание мостовой схемы измерений.

В компенсационном методе измерений разность между значениями величины сравнения и величины, отображающей измеряемую, сводится к нулю путем изменения величины сравнения. Значение измеряемой величины соответствует установленному при уравнивании значению компенсирующей величины сравнения.

Компенсационный метод применяется, в частности, при измерении электродвижущей силы источников тока, когда падение напряжения,

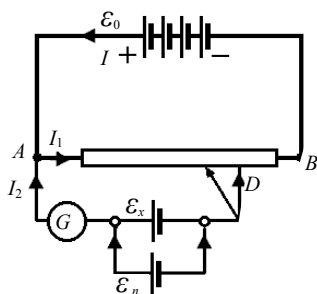


Рис. 1.1. Схема компенсационного метода измерений ЭДС

создаваемого измеряемой ЭДС \mathcal{E}_x на участке реостата AD , компенсируется частью падения напряжения, создаваемого другим источником тока \mathcal{E}_0 (рис. 1.1). При этом значение \mathcal{E}_0 ЭДС вспомогательного источника тока больше \mathcal{E}_x и создает падение напряжения на всем реостате AB . Значение измеряемой ЭДС сравнивается с известным значением \mathcal{E}_n ЭДС нормального элемента, падение напряжения которого компенсируется при другом положении подвижного контакта D . Компенсация измеряемой ЭДС и ЭДС вспомогательного

источника тока регистрируется при равенстве нулю силы тока через электроизмерительный прибор (например, гальванометр) G , который называют индикатором нуля.

Мостовой метод широко применяется для измерения таких электрических величин, как сопротивление, емкость, индуктивность и др. Мостовая схема измерений (рис. 1.2) включает участок электрической цепи, состоящий из четырех элементов, обладающих сопротивлениями R_i (или импедансами Z_i). К диагоналям цепи подключены источник тока и электроизмерительный прибор (гальванометр G). При измерениях добиваются уравнивания измерительного моста, т. е. таких условий, при которых сила тока через измерительный прибор $I_G = 0$. Это достигается подбором сопротивления R_3 при определенном соотношении сопротивлений R_2 и R_4 . Условие равновесия моста:

$$\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Отсюда получаем выражение для определения измеряемого сопротивления:

$$R_x = \frac{R_2}{R_4} R_3.$$

Измерительный прибор является индикатором равновесия, фиксирующим равенство силы тока нулю.

Если элементы мостовой схемы обладают реактивным сопротивлением (емкостным или индуктивным) и питание цепи осуществляется от источника переменного тока, то условие равновесия имеет вид

$$\frac{Z_x}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}.$$

Измерения на переменном токе позволяют определить значение реактивного сопротивления (импеданса):

$$Z_x = \frac{Z_2}{Z_4} Z_3.$$

При чисто емкостном характере сопротивлений элементов мостовой схемы импеданс $Z_x = 1 / \omega C$ (ω – циклическая частота переменного тока; C – емкость); при индуктивном характере – $Z_x = \omega L$ (L – индуктивность). Иными словами, измерения нулевым мостовым методом на переменном токе позволяют определить емкость или индуктивность элементов электрической цепи.

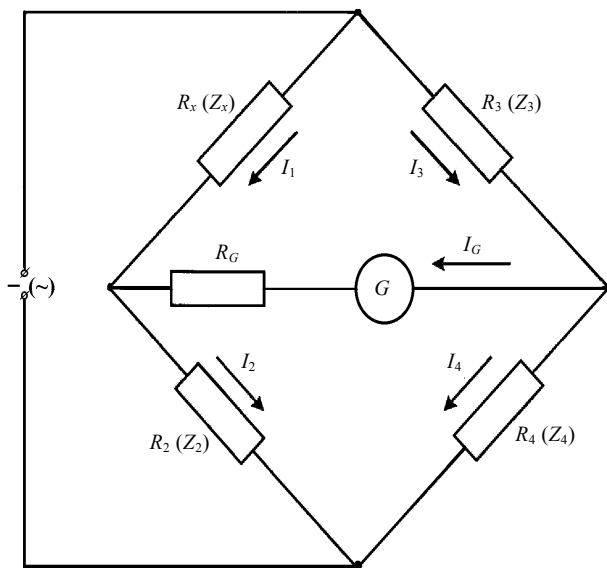


Рис. 1.2. Мостовая схема измерений пассивных электрических величин

При измерении сопротивлений, емкостей и индуктивностей мостовым методом в качестве элемента сравнения ($R_3 (Z_3)$ на рис. 1.2)) используются образцовые мосты сопротивлений, емкостей и индуктивностей соответственно.

Примером реализации метода замещения может служить измерение емкости конденсатора путем включения его в колебательный контур с генератором напряжения. Изменением частоты напряжения в контуре достигается резонанс, а затем вместо измеряемого конденсатора в контур включается образцовый магазин емкостей, настройкой

которого вновь добиваются резонанса. По шкале образцового магазина емкостей при резонансе определяют его емкость, которая равна емкости измеряемого конденсатора.

Кроме того, различают контактный и бесконтактный методы измерений в зависимости от того приводится или не приводится чувствительный элемент средства измерений в контакт с объектом измерения. Примером применения бесконтактного метода является в частности измерение температуры оптическим пирометром.

1.1.4. Средства измерений

Средство измерений – техническое средство (или комплекс технических средств), предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу измеряемой физической величины, размер которой принимается неизменным в течение известного интервала времени.

В качестве средств измерений выступают меры, измерительные приборы и измерительные системы.

Мерой называют средство, воспроизводящее единицу определенного размера. Меры массы – гири; меры вместимости – мерные колбы, стаканы, цилиндры; меры электрических величин – катушки сопротивления и индуктивности определенного номинала, нормальные элементы (меры электродвижущей силы) и т. д.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для выработки определенного вида сигнала измерительной информации в форме, доступной для прямого восприятия, т. е. дающее возможность непосредственно отсчитывать значения измеряемой величины.

Измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменения измеряемой величины, называется аналоговым прибором. Прибор, вырабатывающий автоматически дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме, называется цифровым измерительным прибором. В аналоговых измерительных приборах отсчет значения измеряемой величины производится по шкале, в цифровых приборах – по цифровому отсчетному устройству.

В измерительном приборе прямого преобразования (например, в манометре, амперметре) осуществляется одно или несколько преобразований измеряемой величины, и ее значение находится без сравнения с известной одноименной величиной. В измерительном приборе сравнения измеряемая величина сравнивается непосредственно с одноименной величиной, которая воспроизводится соответствующей мерой (например, равноплечие весы, электроизмерительный потенциометр).

Имеются также интегрирующие и суммирующие измерительные приборы. В интегрирующих приборах подводимая для измерения величина подвергается интегрированию по времени или по другой независимой переменной (например, электрические счетчики, расходомеры). Суммирующие измерительные приборы дают значение суммы двух или нескольких величин, подводимых по различным каналам (например, ваттметр, суммирующий мощности нескольких электрических генераторов).

Измерительные приборы могут быть составными частями измерительных систем (см. разд. 1.3).

1.2. Измерение как процесс преобразования сигналов измерительной информации

1.2.1. Сигналы измерительной информации

Измерительная информация представляется в виде сигналов, которые и являются ее носителями.

Сигнал измерительной информации есть физическая величина, как правило, изменяющаяся во времени, имеющая хотя бы один параметр, который непосредственно (либо опосредованно, через другую связанную с ним величину) содержит информацию, и эта информация может быть определена.

Такие параметры называют информативными; они должны допускать измерение множества значений, быть однозначно связанными с измеряемой величиной, служить мерой значений измеряемой величины и обеспечивать воспроизводимость ее значений при повторении измерений.

Сигналы могут быть аналоговыми и квантованными. Информативный параметр аналогового сигнала в любой момент времени характеризуется каким-то численным значением и может быть представлен бесконечно большим количеством значений. Квантованный (цифровой) сигнал, напротив, представляется конечным числом значений (например, 0, 1 или 0, 1, -1). Области значений, в которых определен такой сигнал, называют интервалами (шагами, уровнями) квантования.

Кроме того, как аналоговые, так и квантованные сигналы могут быть по характеру их изменения во времени непрерывными и прерывистыми (дискретными). Непрерывный сигнал все время изменяется, имеет определенное значение в любой произвольный момент времени. Дискретный сигнал изменяется только в определенных интервалах времени, называемых интервалами (шагами) дискретизации.

Сигналы различают также по виду энергии сигнала. Механические сигналы представляются различными механическими величинами, чаще

всего длиной, перемещением и углом поворота. Электрические сигналы представляются в виде изменения той или иной электрической величины (обычно силы тока или напряжения, а также сопротивления, емкости, индуктивности). Оптические сигналы характеризуются энергетическими и световыми фотометрическими величинами (см. прил. 6).

Сигналы можно различать и по форме представления – гармонические, периодические или непериодические сложной формы, импульсные, аналоговые и цифровые. Существуют также стохастические, или случайные, сигналы, значения которых в любой произвольный момент времени являются случайными величинами.

1.2.2. Измерительные преобразователи. Статические характеристики измерительных преобразователей и средств измерений

Измерение, состоящее в сравнении измеряемой величины с величиной меры, есть процесс преобразования, в результате которого измеряемая величина x_e отображается другой величиной x_a . Это преобразование реализуется функциональным элементом измерительного прибора, который называется измерительным преобразователем.

Измерительный преобразователь – это техническое устройство, созданное на определенном физическом принципе действия, выполняющее одно частное измерительное преобразование, т. е. преобразующее входную физическую величину в другую физическую величину или в соответствующий сигнал отображения, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи, и имеющие нормированные метрологические характеристики.

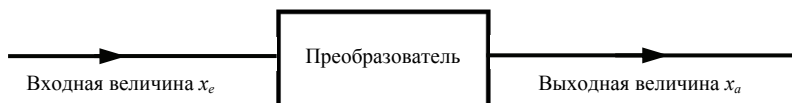
Физическая величина x_e , подаваемая на вход преобразователя, называется входной; величина x_a , отображающая входную величину, называется выходной.

В общем случае алгоритм преобразования можно представить в виде

$$x_a = f(x_e), \quad (1.3)$$

где f – функция преобразования.

Схематически процесс измерения можно представить следующим обобщенным образом:



В простых средствах измерений измеряемая величина отображается непосредственно в виде выходной величины. Однако чаще выходные сиг-

налы первичных измерительных преобразователей подвергаются вторичному преобразованию, что связано с требованием дальнейшей обработки сигнала. При этом должна иметь место однозначная функциональная зависимость между измеряемой величиной и ее отображением, включая и преобразование промежуточной величины:

$$x_a = f(x_e) \text{ или } x_b = f_1(x_e) \text{ и } x_a = f_2(x_b). \quad (1.4)$$

Измерительный преобразователь в составе средства измерений (прибора, устройства, системы), непосредственно воспринимающий измеряемую величину, называют первичным измерительным преобразователем. Измерительные преобразователи, установленные в измерительной цепи после первичного преобразователя, являются вторичными, или промежуточными.

Применение измерительных преобразований является единственным методом практического создания любого измерительного устройства (измерительного прибора). Измерительный прибор представляет собой совокупность измерительных преобразователей.

Совокупность преобразовательных элементов средства измерений, обеспечивающая осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации, называется измерительной цепью.

Измерительное преобразование представляет собой однозначное отражение размера одной физической величины размером другой физической величины, связанной функционально с первой величиной.

Одно и то же измерительное преобразование можно осуществить определенным множеством различных измерительных преобразователей. Например, измерение температуры (преобразование температуры T в перемещение s указателя вдоль шкалы отсчетного устройства) можно провести с применением жидкостного термометра, термопары, термометра сопротивления (терморезистора или термистора), биметаллического термометра и др.

Функцией преобразования измерительного преобразователя называют функциональную зависимость выходной величины от входной, описываемую аналитическим выражением или графиком. График функции преобразования, отображающий зависимость выходной величины от величины входной, называется передаточной характеристикой.

В процессе измерения на первичный измерительный преобразователь воздействует множество параметров, из которых необходимо выделить только один – измеряемую величину. Все остальные параметры являются помехами. Поэтому для каждого измерительного преобразователя необходимо установить его естественную входную величину, которая лучше всего воспринимается им на фоне помех.

Аналогично можно выделить естественную выходную величину преобразователя.

Если входная величина не изменяется во времени, то процесс измерений является статическим; функция преобразования, в том числе и ее график, называется статической характеристикой преобразования средства измерений. При очень медленном изменении входной измеряемой величины измерения можно считать квазистатическими, т. е. такими, при которых в процессе измерения показания измерительного прибора в каждый момент времени соответствуют значению измеряемой величины. Статическим режимом измерений называется режим, при котором выходной сигнал остается неизменным в течение времени его использования (или изменяется так медленно, что каждый результат измерения может быть выражен только одним значением).

При быстрых изменениях измеряемой величины показания измерительного прибора, как правило, запаздывают во времени вследствие инерционности по сравнению с изменением во времени входной величины. В этом случае измерения называют динамическими, и требуют рассмотрения динамических характеристик средств измерений.

Если связь между входной и выходной величинами при преобразовании является линейной, то функция преобразования $x_a = f(x_e)$ измерительного преобразователя графически отображается прямой линией. Преобразование при этом описывается уравнением

$$x_a = K_p x_e, \quad (1.5)$$

где K_p – коэффициент передачи (передаточный коэффициент) измерительного преобразователя или измерительного преобразования.

Передаточным коэффициентом характеризуют все линейные преобразователи и передаточные звенья, а также те преобразователи, которые могут быть сведены к линейным.

Поскольку в общем случае входная и выходная величины неоднородны, то передаточный коэффициент имеет единицу измерения: $[K_p] = [x_a] / [x_e]$. Если передаточная характеристика не проходит через начало координат $x_a = f(x_e)$ (характеристика со смещенным нулем), то это означает, что в средстве измерения возникает дрейф нулевого отсчета, который стремятся скомпенсировать.

Итак, к статическим характеристикам измерительных преобразователей относят: функцию преобразования, передаточный коэффициент, передаточную характеристику, а также чувствительность, порог чувствительности и разрешающую способность.

Чувствительность преобразователя – это величина, показывающая, на сколько изменяется приращение выходной величины x_a при определенном приращении входной величины x_e :

$$S = \frac{\Delta x_a}{\Delta x_e}. \quad (1.6)$$

Чувствительность, как правило, именованная величина, выражаемая в единицах, зависящих от природы входной и выходной величин и совпадающих с единицами передаточного коэффициента: $[S] = [K_p]$. Например, чувствительность термопары определяется изменением значения термоЭДС, возникающей при изменении разности температур ее спаев на 1 К, называется дифференциальной термоЭДС (постоянной термопары) и измеряется в милливольтках на кельвин (мВ/К); чувствительность вакуумного фотоэлемента – изменением силы фототока насыщения, возникающего при изменении на 1 лм падающего на фотоэлемент светового потока, и измеряется в микроамперах на люмен (мкА/лм).

В цифровых измерительных устройствах минимальному изменению выходной величины ΔZ соответствует изменение выходного кода (числа) на единицу младшего разряда этого числа, отображаемого цифровым индикатором. Поэтому чувствительность цифрового измерительного прибора определяется выражением

$$S_{\text{цифр}} = \frac{\Delta Z}{\Delta x_e}. \quad (1.7)$$

Вследствие того что $\Delta Z = 1$, в качестве чувствительности цифровых приборов иногда указывают просто Δx_e , имея в виду, что выходной код изменяется на единицу младшего разряда.

Порог чувствительности представляет собой наименьшее значение измеряемой величины, которое вызывает заметное для восприятия изменение выходного сигнала средства измерений. Единица измерения порога чувствительности совпадает с единицей соответствующей измеряемой величины. По заметному для восприятия изменению выходного сигнала $x_{a \text{ пор}}$ и чувствительности S средств измерений можно рассчитать порог чувствительности $x_{e \text{ пор}}$:

$$x_{e \text{ пор}} = S^{-1} \Delta x_{a \text{ пор}}. \quad (1.8)$$

Часто наряду с абсолютным порогом $x_{e \text{ пор}}$ указывают относительный порог чувствительности $x_{e \text{ пор}}^* = x_{e \text{ пор}} / x_e$.

Чувствительность измерительного прибора, состоящего из последовательного ряда измерительных преобразователей, определяется

произведением чувствительностей всех преобразователей, образующих канал передачи информации. Общая чувствительность измерительного прибора, состоящего из n последовательных измерительных звеньев, $S = \Delta x_a / \Delta x_e$. С другой стороны, S выражается через чувствительности каждого из преобразователей:

$$S = \frac{\Delta x_{a1}}{\Delta x_{e1}} \frac{\Delta x_{a2}}{\Delta x_{e2}} \dots \frac{\Delta x_{an}}{\Delta x_{en}}.$$

С учетом того, что каждая выходная величина предыдущего преобразователя является входной величиной последующего ($x_{a1} = x_{e2}$ и т. д.), получаем

$$S = \prod_{i=1}^n S_i. \quad (1.9)$$

Разрешающая способность средства измерений определяется минимальной разностью двух значений однородных величин, которая может быть различима при их измерении.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

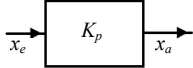
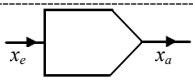
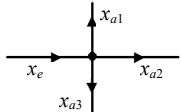
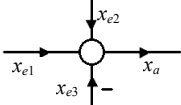
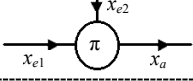
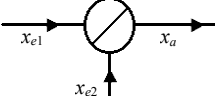
1. Сформулируйте цели, задачи и предмет дисциплины «Измерение физических величин».
2. Приведите определения и уясните смысл понятий: измерение, физическая величина, значение физической величины, истинное, действительное и измеренное значения физической величины, единица и размерность физической величины.
3. Дайте классификацию физических величин.
4. Перечислите основные и производные единицы СИ, приставки для обозначения кратностей и долей единиц измерения.
5. Дайте определения метода и принципа измерений.
6. Приведите классификацию методов измерений. Дайте характеристику и приведите примеры применения каждого из методов.
7. Приведите классификацию средств измерений. Дайте определения каждой из групп измерительных устройств.
8. Что понимают под сигналом измерительной информации и его информативными параметрами? Приведите классификацию сигналов.
9. Дайте определения понятий: входная величина, выходная величина, измерительный преобразователь, измерительное преобразование, функция преобразования. Запишите основное уравнение измерений.
10. Перечислите основные статические характеристики измерительных преобразователей и средств измерений. Приведите определения характеристик и уясните их смысл.

1.2.3. Блок-схемы преобразования сигналов в средствах измерений

Процесс преобразования и передачи сигналов в средствах измерений изображается графически в виде блок-схем, которые, в свою очередь, используются для анализа работы средств измерений и определения их характеристик. При построении функциональных блок-схем сигналы обозначаются буквенными символами, а направления их передачи указываются стрелками. Основные элементы передачи и преобразования сигналов обозначаются на блок-схемах специальными графическими символами (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Основные элементы передачи и преобразования сигналов

Название звена	Схематическое обозначение	Выполняемая функция	Примечание
Линейное передаточное звено		$x_a = K_p x_e$	K_p — передаточный коэффициент. Внутри графического символа также может быть указана характеристика звена (передаточная функция, переходная функция и т. п.)
Нелинейное передаточное звено		$x_a = f(x_e)$	Внутри графического символа может быть указана характеристика звена (передаточная функция, переходная функция и т. п.)
Узел разветвления		$x_{a1} = x_{a2} = x_{a3} = x_e$	Число выходящих сигналов не может превышать трех на узел
Узел суммирования		$x_a = x_{e1} + x_{e2} - x_{e3}$	Знак «-» указывается рядом со стрелкой; знак «+» не указывается
Узел перемножения		$x_a = x_{e1} x_{e2}$	При числе сомножителей более двух используют дополнительные звенья
Узел деления		$x_a = \frac{x_{e1}}{x_{e2}}$	—

При этом следует обратить внимание на то, что линейное передаточное и суммирующее звенья являются линейными, а нелинейными – нелинейное передаточное, множительное и делительное звенья.

Помимо функционально зависимых сигналов (обычно это сигналы, зависящие от времени) в ряде случаев используют и постоянные величины, обозначаемые на блок-схемах угловыми скобками $\langle \rangle$, внутри которых записывают символ самой величины.

Необходимые для понимания функционирования измерительных устройств энергетические воздействия обозначают сдвоенной стрелкой \Rightarrow , которая свидетельствует о том, что данный сигнал разрешает подвод энергии либо включает источник, формирующий последующий сигнал.

Разработку блок-схем передачи сигналов в измерительном устройстве осуществляют в такой последовательности:

- устанавливают входную и выходную величины (сигналы) и направления их действия;
- строят физико-математическую модель измерительного устройства, т. е. записывают математически в виде формул физические законы, на основе которых оно действует, с учетом условий измерения;
- выбирают последовательность преобразований сигналов: входного в промежуточные и далее – в выходной ($x_e \rightarrow x_b \rightarrow \dots \rightarrow x_a$);
- составляют необходимые уравнения, описывающие преобразования сигналов;
- представляют отдельные уравнения соответствующими элементами блок-схемы (например, узлами суммирования или передаточными звеньями); последовательность этих элементов определяется прохождением сигналов из уравнения в уравнение, каждое из которых использует только один раз;
- определяют, какие сигналы должны сравниваться между собой, т. е. подводиться к узлам суммирования, и какие величины для этого потребуются;
- задают знаки алгебраического суммирования сигналов в узлах суммирования и знаки « \leftarrow » указывают на блок-схеме;
- определяют входные сигналы узлов суммирования, выбирая их из соответствующих узлов разветвлений и обратных воздействий;
- определяют воздействие выходного сигнала на сравниваемые сигналы и тем самым устанавливают необходимые обратные связи (взаимные воздействия), для чего обычно используются промежуточные сигналы;
- дополняют блок-схему связями, замыкающими выходы на открытые входы элементов (за исключением входа сигнала x_e). При этом сигналы на входы суммирующих узлов подводят через узлы разветвления либо задают в виде определенных констант;
- обозначают выходной сигнал.

Передаточные звенья на блок-схемах сигналов являются условными и не обязательно соответствуют определенным техническим средствам. Блок-схемы сигналов одинаковых приборов или одного и того же прибора могут несколько различаться в зависимости от принципов их разработки и цели анализа; тем не менее, блок-схемы отражают один и тот же результат действия прибора.

При изображении блок-схем сигналов электрических измерений следует помнить, что стрелки указывают на-

правления действия сигналов, а не направления протекания электрического тока. Узел разветвления сигналов измерительной информации блок-схемы означает, что один и тот же сигнал без изменения передается по нескольким направлениям измерительной цепи. Рис. 1.3 иллюстрирует различия между узлом разветвления токов в схеме электрической цепи и узлом разветвления токовых сигналов в блок-схеме.

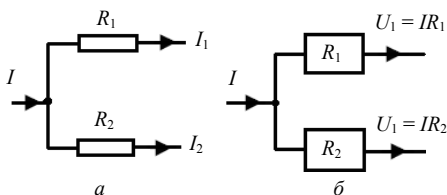


Рис. 1.3. Отображение узлов разветвления:
а – токов в электрической схеме;
б – токовых сигналов в блок-схеме

При анализе работы сложных измерительных средств часто оказывается целесообразным предварительно преобразовать блок-схему сигналов и тем самым упростить ее. При этом совокупность звеньев блок-схемы заменяется одним передаточным звеном. Некоторые преобразования такого рода приведены в табл. 1.2.

Выведем формулы для расчета коэффициента преобразований при различных типах соединений преобразователей.

При последовательном соединении двух преобразователей

$$x_a = K_p x_e; \quad K_p = \frac{x_a}{x_e}; \quad K_{p1} = \frac{x_b}{x_e}; \quad K_{p2} = \frac{x_a}{x_b};$$

$$K_p = \frac{x_a}{x_e} = \frac{x_b}{x_e} \frac{x_a}{x_b} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow K_p = K_{p1} K_{p2}. \quad (1.10)$$

Обобщая на произвольное число n соединенных последовательно преобразователей, получим

$$K_p = \prod_{n=1}^n K_{pi}. \quad (1.11)$$

При параллельном соединении двух преобразователей

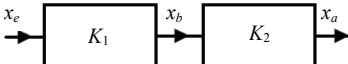
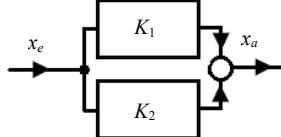
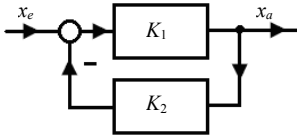
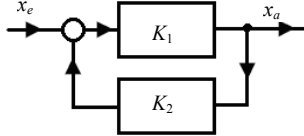
$$x_a = x_1 + x_2 = K_{p1}x_e + K_{p2}x_e = (K_{p1} + K_{p2})x_e = K_px_e \Rightarrow K_p = K_{p1} + K_{p2}. \quad (1.12)$$

Передаточный коэффициент n соединенных параллельно преобразователей

$$K_p = \sum_{n=1}^n K_{pi}. \quad (1.13)$$

Таблица 1.2

Преобразования совокупности звеньев блок-схем

Операция преобразования	Исходная совокупность звеньев	Эквивалентный передаточный коэффициент
Замена последовательной цепи		$K_p = K_{p1}K_{p2}$
Замена параллельной цепи		$K_p = K_{p1} + K_{p2}$
Преобразование контура отрицательной обратной связи		$K_p = \frac{K_{p1}}{1 + K_{p1}K_{p2}}$
Преобразование контура положительной обратной связи		$K_p = \frac{K_{p1}}{1 - K_{p1}K_{p2}}$

В измерительной технике широко используются передаточные звенья с обратной связью.

Обратная связь – воздействие результатов какого-либо процесса на его протекание. Если при таком воздействии интенсивность процесса возрастает, то обратная связь называется положительной, в противоположном случае имеет место отрицательная обратная связь. Отрицательная обратная связь может обеспечить автоматическое поддержание регулируемых физических характеристик системы на требуемом уровне. Положительная обратная связь приводит к тому, что возникшее отклонение от стационарного состояния все более увеличивается и ранее устойчивая система может стать неустойчивой.

Действие передаточного звена с обратной связью рассмотрим на примере принципа работы усилителя сигналов.

Схема, иллюстрирующая принцип действия усилителя электрического напряжения с обратной связью, приведена на рис. 1.4. Коэффициент усиления самого усилителя без обратной связи равен K_{y0} . Определенная часть выходного напряжения с помощью аттенюатора, коэффициент передачи которого равен γ , подается в виде сигнала обратной связи на вход усилителя, где с помощью сумматора складывается с входным напряжением (γ – величина, показывающая, какая часть выходного напряжения подается на вход усилителя).

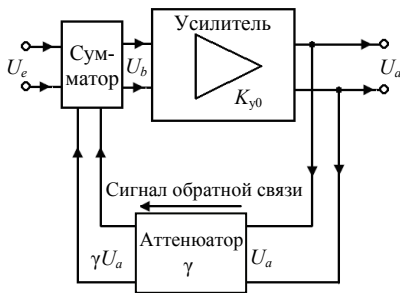


Рис. 1.4. Схема усилителя электрического напряжения с обратной связью

Определим результирующий коэффициент усиления такого преобразователя. По определению он равен отношению выходного напряжения к входному:

$$K_y = \frac{U_a}{U_e}.$$

Напряжение на входе основного усилителя с коэффициентом усиления K_{y0}

$$U_b = U_e + \gamma U_a.$$

Поскольку выходное напряжение $U_a = K_{y0} U_b$, то

$$U_a = K_{y0}(U_e + \gamma U_a).$$

Отсюда

$$U_a(1 - \gamma K_{y0}) = K_{y0} U_e;$$

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{K_{y0}}{1 - \gamma K_{y0}}.$$

Следовательно, коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$K_y = \frac{K_{y0}}{1 - \gamma K_{y0}}. \quad (1.14)$$

При выполнении последнего соотношения обратная связь положительна. При $\gamma K_{y0} = 1$ коэффициент усиления $K \rightarrow \infty$. Бесконечное усиление подразумевает, что сигнал на выходе усилителя будет возникать

в отсутствие сигнала на входе, именно это и происходит. На положительной обратной связи основан принцип действия генераторов сигналов.

Чтобы обратная связь была отрицательной, необходимо изменить знак у величины γ , вычитая сигнал обратной связи из входного, а не складывая их. Тогда коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью

$$K_y = \frac{K_{y0}}{1 + \gamma K_{y0}}. \quad (1.15)$$

Для любого передаточного звена с отрицательной обратной связью (см. соответствующую схему в табл. 1.2):

$$\begin{aligned} x_a &= K_{p1}x_1; \quad x_2 = K_{p2}K_{p1}x_1; \\ x_1 &= x_e - x_2 = x_e - K_{p2}K_{p1}x_1; \\ x_e &= (1 + K_{p1}K_{p2})x_1; \\ x_1 &= \frac{x_e}{1 + K_{p1}K_{p2}}; \\ x_a &= K_{p1}x_1 = \frac{K_{p1}}{1 + K_{p1}K_{p2}} x_e; \\ K_p &= \frac{K_{p1}}{1 + K_{p1}K_{p2}}, \end{aligned} \quad (1.16)$$

где K_p – общий передаточный коэффициент звена; K_{p1} – передаточный коэффициент преобразователя без обратной связи; K_{p2} – передаточный коэффициент цепи обратной связи.

Для передаточного звена с положительной обратной связью

$$K_p = \frac{K_{p1}}{1 - K_{p1}K_{p2}}. \quad (1.17)$$

1.2.4. Расчет статических характеристик средств измерений на основе блок-схем преобразования сигналов

При исследовании блок-схем преобразования сигналов с целью аналитического определения передаточных коэффициентов используются понятия пути и контура. Путь – связь на блок-схеме между входным x_e и выходным x_a сигналами с учетом направления передачи сигнала. Контуром первого порядка называют замкнутую цепь по пути передачи сигнала, содержащую не более одного узла; иначе говоря, это однократно замкнутый путь. Пути и контуры характеризуют значениями, равными

произведениям передаточных коэффициентов входящих в них звеньев с учетом знаков сигналов в узлах суммирования.

Понятие о путях и контурах иллюстрируется на примере блок-схемы, представленной на рис. 1.5.

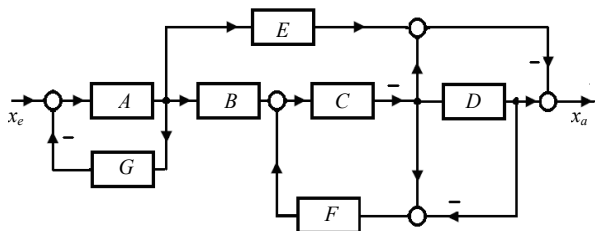


Рис. 1.5. Блок-схема сигналов, иллюстрирующая понятия пути и контура

Блок-схема включает три пути и три контура первого порядка. Ниже приведены обозначения путей и контуров; выражения в скобках – значения соответствующих путей контуров.

Пути P_k ($k = 1, \dots, n$):

$$P_1: x_e \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow x_a \quad (A \cdot B \cdot C \cdot D);$$

$$P_2: x_e \rightarrow A \rightarrow E \rightarrow x_a \quad (-A \cdot E);$$

$$P_3: x_e \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow x_a \quad (A \cdot B \cdot C).$$

Контур S_i ($i = 1, \dots, r$):

$$S_1: A \rightarrow G \quad (-A \cdot G);$$

$$S_2: C \rightarrow F \quad (C \cdot F);$$

$$S_3: C \rightarrow D \rightarrow F \quad (-C \cdot D \cdot F).$$

Произведение двух не касающихся контуров называется контуром второго порядка, и соответственно произведение n не касающихся контуров – контуром n -го порядка.

В блок-схеме имеются два контура второго порядка:

$$S_{12} = S_1 \cdot S_2 \quad (-A \cdot G \cdot C \cdot F);$$

$$S_{13} = S_1 \cdot S_3 \quad (A \cdot G \cdot C \cdot D \cdot F).$$

Расчет передаточного коэффициента средства измерений на основе блок-схемы преобразования сигналов измерительной информации осуществляется по формуле, полученной на основе математической теории графов. В наиболее общем случае алгоритм для вычисления передаточного коэффициента имеет вид

$$K_p = \frac{\sum_{k=1}^n P_k \left(1 - \sum_{i=1}^r S_i + \sum_{(i,j)=1}^s S_{(i,j)} - \dots \right)}{1 - \sum_{i=1}^m S_i + \sum_{(i,j)=1}^p S_{(i,j)} - \dots}, \quad (1.18)$$

где P_k – значения путей; S_j – значения контуров первого порядка; $S_{(ij)}$ – значения контуров второго порядка; n – количество путей; m – количество контуров первого порядка; p – число контуров второго порядка; r – число контуров первого порядка, не относящихся к одному пути; s – число контуров второго порядка, не относящихся к одному пути; * – суммы контуров, не связанных на данном пути.

Согласно этому выражению, передаточный коэффициент блок-схемы, изображенной на рис. 1.5, запишется в виде

$$K_p = \frac{P_1 + P_2(1 - S_2 - S_3) + P_3}{1 - S_1 - S_2 - S_3 + S_{12} + S_{13}} =$$

$$= \frac{A \cdot B \cdot C \cdot D - A \cdot E \cdot (1 - C \cdot F + C \cdot D \cdot F) + A \cdot B \cdot C}{1 + A \cdot G - C \cdot F + C \cdot D \cdot F - A \cdot G \cdot C \cdot F + A \cdot G \cdot C \cdot D \cdot F}.$$

Если блок-схема сигналов включает только пути и контуры первого порядка, то выражение для передаточного коэффициента имеет вид

$$K_p = \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{1 - \sum_{i=1}^m S_i}. \quad (1.19)$$

Применение блок-схем преобразования сигналов является одним из методов описания принципа действия и инструментом исследования различных средств измерений, в том числе достаточно сложных измерительных систем. При составлении блок-схем абстрагируются от деталей технической реализации соответствующих устройств. На основе блок-схем выясняются взаимосвязи между сигналами измерительной информации на различных этапах преобразования, и в соответствии с (1.18) выводятся аналитические выражения для определения характеристик и функций преобразования средств измерений, работающих как в статическом, так и в динамическом режимах.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Перечислите основные элементы передачи и преобразования сигналов измерительной информации; приведите их символические обозначения.
2. Укажите последовательность разработки блок-схем передачи сигналов измерительной информации.
3. Что понимают под физико-математической моделью измерительного устройства?
4. Приведите вывод формул для расчета передаточных коэффициентов при различных типах соединений измерительных преобразователей.

5. Каков смысл понятий: «обратная связь», «положительная обратная связь», «отрицательная обратная связь»?
6. Рассмотрите принцип действия усилителя электрических сигналов с обратной связью.
7. Приведите определения путей и контуров блок-схем передачи сигналов измерительной информации. Как определяются значения путей и контуров?
8. Запишите формулу для вычисления передаточного коэффициента средства измерений на основе анализа блок-схемы сигналов. Поясните смысл величин, входящих в формулу.

1.2.5. Динамические измерения физических величин

В предыдущих подразделах рассматривались статический и квазистатический режимы измерений, при реализации которых средства измерений характеризуются статическими параметрами, такими как передаточная характеристика, передаточный коэффициент, чувствительность и порог чувствительности.

Если же входная измеряемая величина изменяется во времени $x_e = x_e(t)$, то имеет место соответствующее изменение выходной величины $x_d(t)$ и измерение осуществляется в динамическом режиме. Режим измерений, результатом которого является функциональная зависимость выходной величины от времени, т. е. когда выходной сигнал средства измерения изменяется во времени в соответствии с изменением входной измеряемой величины, называется динамическим. При этом желательно, чтобы выходная величина безошибочно отображала входную величину в процессе ее изменения.

Однако это выполняется далеко не во всех средствах измерений, особенно при возрастании скорости изменения входной величины. Например, при использовании для измерений величин, изменяющихся во времени, приборов со стрелочным механизмом вследствие инерционности механических элементов происходит запаздывание перемещения стрелочного указателя по сравнению с изменением измеряемой величины. Причем запаздывание, или временная задержка, средства измерений может проявляться и при мгновенной подаче на его вход измеряемой величины с конечным постоянным значением; из-за возникающего переходного процесса выдача измеренного значения задерживается до момента завершения этого процесса. Например, при взвешивании предмета на весах происходят колебания стрелки весов вблизи деления, соответствующего значению массы предмета, с постепенным затуханием и установлением стрелки в состоянии покоя.

Подобным свойством – возникновением затухающего колебательного процесса перед установлением показаний – обладают многие измерительные

преобразователи. В механических и электромеханических преобразователях колебания возникают вследствие действия сил упругости и демпфирования, в тепловых приборах – из-за наличия теплоемкости, в электрических и электронных системах – из-за наличия емкостных и индуктивных цепей.

При измерении величин, зависящих от времени, также желательно уменьшение инерционности преобразователей и обеспечение пропорциональности между значениями выходной и входной величин. С другой стороны, если на вход преобразователя поступает смесь полезной измеряемой величины и более высокочастотной помехи (шума), то преобразователю, наоборот, стремятся придать инерционность, благодаря которой помехи сглаживаются.

Динамические параметры и характеристики измерительных преобразователей отражают реакцию преобразователей на изменения во времени входных воздействий.

Динамические характеристики средств измерений подразделяются на полные и частные.

К полным динамическим характеристикам аналоговых преобразователей, которые можно рассматривать как линейные, относятся:

- дифференциальное уравнение, описывающее работу средства измерений;
- переходная и импульсная переходная характеристики;
- амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики;
- комплексный коэффициент передачи, представляющий собой совокупность амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик;
- передаточная функция.

К частным динамическим характеристикам относят любые функционалы или параметры полных динамических характеристик, к примеру такие, как времена задержки: время установления, время успокоения, время запаздывания, а также порядок задержки, постоянная времени и др.

Полные динамические характеристики средств измерений можно еще подразделить на временные и частотные. К полным временным характеристикам относятся переходная и импульсная переходная; к полным частотным – амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики, а также комплексный коэффициент передачи и передаточная функция.

Характер и параметры задержки сигнала измерительным преобразователем определяют, как правило, экспериментальным путем. При этом на вход измерительного преобразователя воздействуют известным тестовым сигналом $x_c(t)$, который определенным образом изменя-

ется во времени, и наблюдают соответствующее изменение выходного сигнала $x_a(t)$, или отклик.

Тестовый сигнал, формируемый функциональным генератором, и отклик испытуемого преобразователя синхронно регистрируются. При этом регистрирующий прибор, как правило, двухканальный, не должен вносить дополнительной временной задержки сигнала.

В качестве тестовых используют детерминированные или случайные сигналы (последние – с известной функцией распределения). Ограничимся рассмотрением детерминированных тестовых сигналов. В качестве таковых используются либо апериодические сигналы типа единичного скачка, дельта-функции и пилообразной формы, либо периодические, обычно гармонические синусоидальные. Апериодические тестовые сигналы используются для определения временных динамических характеристик, периодические – для определения частотных характеристик.

Сравнительно большое количество динамических параметров средств измерений обусловлено тем, что при измерении различных по характеру зависимости от времени величин проявляются различные характеристики средств измерений и из-за многообразия измеряемых физических величин невозможно использовать во всех случаях однотипный тестовый сигнал.

Задержку отклика измерительного преобразователя во времени можно описать соответствующим уравнением, отображающим функциональную зависимость выходной величины x_a от входной x_e :

$$x_a(t) = K_p x_e(t), \quad (1.20)$$

где K_p – коэффициент преобразования.

При наличии временных задержек выходной величины относительно соответствующих изменений входной величины в уравнении (1.20) появляются члены, содержащие производные выходной величины $x_a(t)$ по времени. Наивысший порядок производной определяется порядком задержки. Например, уравнение, описывающее измерительный преобразователь с задержкой второго порядка, имеет вид

$$a_2 \frac{d^2 x_a(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx_a(t)}{dt} + a_0 x_a(t) = K_p x_e(t). \quad (1.21)$$

Суммируемые в левой части уравнения выражения должны иметь одинаковые размерности. Поэтому

$$\dim \frac{dx_a}{dt} = \frac{\dim x_a}{T}, \text{ а } \dim \frac{d^2 x_a}{dt^2} = \frac{\dim x_a}{T^2}.$$

Отсюда следует, что $\dim a_0 = 1$, $\dim a_1 = T$, $\dim a_2 = T^2$. Величину a_1 называют постоянной времени и обозначают T . Аналогично величину a_2 ,

называемую постоянной времени второго порядка, можно обозначить T^2 . И следовательно, в этих обозначениях $a_0 = 1$.

Тогда дифференциальное уравнение для измерительного преобразователя с задержкой второго порядка можно записать в виде

$$T_2^2 \frac{d^2 x_a}{dt^2} + 2T_1 \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_p x_e, \quad (1.22)$$

а для преобразователя с задержкой первого порядка

$$T \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_p x_e. \quad (1.23)$$

1.2.6. Временные динамические характеристики измерительных преобразователей и средств измерений

Временные характеристики измерительных преобразователей и средств измерений определяются при использовании аperiodических скачкообразных тестовых сигналов, частотные – при применении периодических тестовых сигналов.

Решением дифференциального уравнения (1.23) является функция

$$h(t) = K_p \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right], \quad (1.24)$$

а уравнения (1.22) – функция

$$h(t) = K_p \left[1 - \frac{\exp(-\beta \omega_0 t)}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin\left(\omega_0 t \sqrt{1-\beta^2} + \arccos \beta\right) \right], \quad (1.25)$$

где β – коэффициент затухания (демпфирования); ω_0 – собственная циклическая частота незатухающих колебаний измерительной цепи.

Соотношения между этими параметрами и постоянными времени следующие:

$$\beta = \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_1}{T_2} \omega_0; \quad T_2 = \frac{1}{\omega_0}.$$

Функции (1.24) и (1.25) описывают временную задержку отклика измерительного преобразователя на скачкообразный тестовый сигнал и называются переходными функциями преобразователей, соответственно с задержкой первого и второго порядков.

При динамических измерениях с задержкой второго порядка откликом на воздействие аperiodической скачкообразной входной величины является затухающий периодический процесс, описываемый пе-

реходной функцией (1.25). В том случае когда сопротивление колебаниям значительно, периодический затухающий процесс переходит в аperiodический процесс затухания. Процесс измерения при этом будет характеризоваться задержкой первого порядка и описываться дифференциальным уравнением (1.23) и переходной функцией (1.24).

Для выяснения смысла величин β и ω_0 в выражении (1.25) напомним вывод дифференциального уравнения затухающих колебаний, например механической системы. Такие колебания совершаются под действием возвращающей квазиупругой силы $F_{\text{возвр}} = -kx$ и затухают при наличии силы сопротивления среды $F_{\text{сопр}} = -b\upsilon$. Уравнение динамики движения системы имеет вид

$$-kx - b\upsilon = ma, \quad (1.26)$$

где k – коэффициент упругости (пропорциональности между смещением x и значением возвращающей силы); x – смещение от положения равновесия (координата); b – коэффициент сопротивления среды; υ – скорость движения системы; m – масса системы; a – ее ускорение.

$$ma + b\upsilon + kx = 0, \text{ или } m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0. \quad (1.27)$$

После несложных преобразований получим

$$a + \frac{b}{m}\upsilon + \frac{k}{m}x = 0, \quad (1.28)$$

или

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (1.29)$$

где

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.30)$$

является циклической частотой собственных колебаний системы;

$$\beta = \frac{b}{2m} \quad (1.31)$$

называется коэффициентом затухания колебаний. Выражение (1.29) – дифференциальное уравнение затухающих колебаний.

Левые части выражений (1.22), (1.27) и (1.29), с учетом соотношений (обозначений) $m = T_2^2$, $b = 2T_1$ и $k = 1$, аналогичны.

Из их сопоставления получаем следующие выражения для коэффициента затухания и частоты собственных колебаний измерительной цепи:

$$\beta = \frac{T_1}{T_2^2}, \quad (1.32)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{T_2^2}} = \frac{1}{T_2}, \quad (1.33)$$

а также соотношения

$$T_2 = \frac{1}{\omega_0} \text{ и } \beta = \frac{T_1}{T_2} \omega_0. \quad (1.34)$$

В том случае когда сила сопротивления среды превышает возвращающую силу, периодический затухающий процесс переходит в аperiodический процесс затухания. Процесс измерения при этом будет характеризоваться задержкой первого порядка и описываться дифференциальным уравнением (1.23).

Формулы (1.32) и (1.33) позволяют выразить коэффициент затухания (демпфирования) β и собственную частоту ω_0 через постоянные времени T_1 и T_2 , которые, в свою очередь, могут быть определены экспериментально с применением тестовых сигналов и анализа откликов на них. Рассмотрим типичные аperiodические тестовые сигналы и отклики на них.

Для определения временных динамических характеристик измерительного преобразователя можно использовать скачкообразные тестовые сигналы. При этом на вход преобразователя очень быстро (в идеале мгновенно) подается сигнал, отображающий физическую величину, имеющую постоянное значение x_{e0} .

Реакцию преобразователя на такой скачок, поданный на вход преобразователя в момент времени t_0 , называют переходной функцией $h(t)$ измерительного преобразователя, которая выражается аналитически аналогично (1.24) или (1.25).

На рис. 1.6 представлен график переходной функции, описываемой формулой (1.24), для измерительного преобразователя с временной задержкой первого порядка, переходный процесс в котором является аperiodическим.

Так как теоретически выходная величина достигает своего действительного значения за бесконечно большой интервал времени, то для характеристики процесса установления действительного значения величины $x_{a0} = K_p x_{e0}$ определяют время установления измерительного преобразователя $T_E = T_{95}$, за которое эта величина достигает определенного уровня, обычно 95% от устанавливающегося действительного значения. Абсцисса точки пересечения касательной к графику функции

в точке, соответствующей моменту времени t_0 , с линией x_a определяет постоянную времени T .

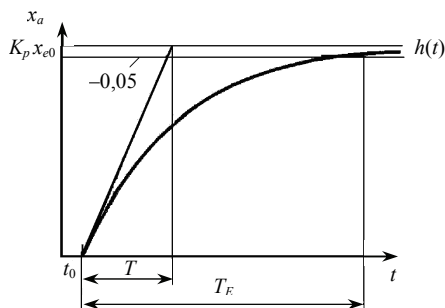


Рис. 1.6. Переходная функция средства измерения с временной задержкой первого порядка

Поскольку при $t = 3T \exp(-t/T) = \exp(-3) \approx 0,05$, т. е. $h(t)$ отличается от значения, равного единице, с отклонением $\pm 5\%$, то время установления $T_E \approx 3T$. К моменту, равному постоянной времени (при $t = T$), переходная функция

$$h(t) = K_p \left[1 - \exp\left(-\frac{T}{T}\right) \right] = K_p [1 - \exp(-1)] = 0,632 K_p, \quad (1.35)$$

и выходная величина принимает значение, равное 63,2% от ее устанавливающегося действительного значения.

График переходной функции $h(t)$, описываемой аналитически выражением (1.25), для преобразователей с временной задержкой второго порядка с затухающим колебательным переходным процессом и запаздыванием представлен на рис. 1.7.

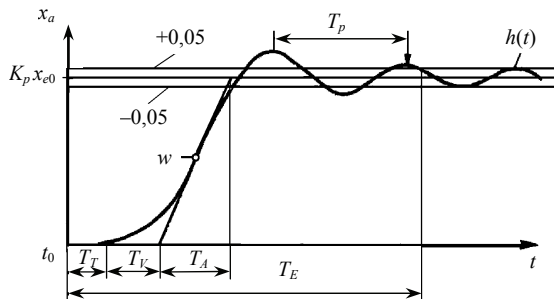


Рис. 1.7. Переходная функция средства измерения с временной задержкой второго порядка

Время запаздывания сигнала T_T представляет собой интервал от момента t_0 начала действия единичного скачка до появления воспринимаемого значения отклика, что зависит от порогов чувствительности испытуемого преобразователя и регистрирующего устройства. Время задержки колебаний T_V определяется по точке пересечения с осью абсцисс касательной в точке w перегиба графика. Время установления колебаний T_A определяется моментом времени пересечения касательной в точке w с действительным значением $x_{a0} = K_p x_{e0}$. Период колебаний средства измерения равен T_p . В качестве времени установления средства измерения T_E принимается интервал времени, по истечении которого выходная величина в затухающем колебательном переходном процессе перестает выходить за границы, превышающие $\pm 0,05 (\pm 5\%)$ действительного значения $x_{a0} = K_p x_{e0}$.

Откликом на очень короткий ($\Delta t \rightarrow 0$) интенсивный (амплитуда $A \rightarrow \infty$) тестовый сигнал (импульс) (рис. 1.8, а) является импульсная переходная функция $g(t)$, которая получается дифференцированием по времени переходной функции $h(t)$:

$$g(t) = \frac{d}{dt} h(t) = \frac{d}{dt} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right] = \frac{1}{T} \exp\left(-\frac{t}{T}\right). \quad (1.36)$$

График этой функции представлен на рис. 1.8, б. Постоянная времени T определяется с применением касательной к графику функции в точке, соответствующей моменту времени окончания воздействия тестового сигнала t_0 .

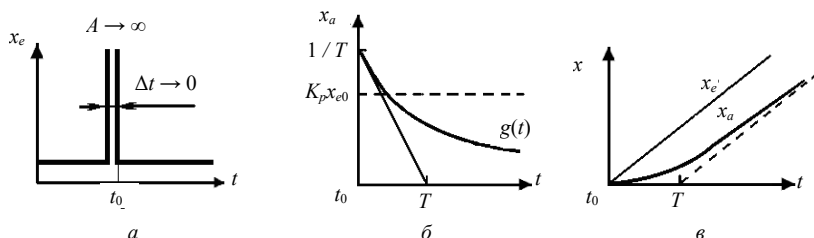


Рис. 1.8. Импульсная переходная функция (б) средства измерения с временной задержкой первого порядка как отклик на тестовый сигнал в виде импульса (а); в – отклик средства измерения на пилообразный тестовый сигнал

Импульс, как и скачок, – математическая идеализация. На практике для определения импульсной переходной функции формируют импульсный сигнал такой длительности, чтобы до его завершения испытуемая система все еще оставалась в состоянии покоя.

Соответственно переходная и импульсная переходная функции являются переходной и импульсной переходной динамическими характеристиками измерительных преобразователей.

На рис. 1.8, в показан также подход в определении постоянной времени T при использовании равномерно нарастающего пилообразного тестового сигнала.

1.2.7. Частотные динамические характеристики измерительных преобразователей и средств измерений

При использовании периодического синусоидального сигнала в качестве тестового откликом является также синусоидальный сигнал с временной задержкой. Частота обоих сигналов – входного и выходного – остается одной и той же, но их амплитуды различны и имеется фазовый сдвиг (рис. 1.9). Отношение амплитуд выходного и входного сигналов и сдвиг фаз $\delta\varphi$ зависят от частоты испытательного сигнала: $x_{a0} / x_{e0} = f_1(\omega)$ и $\delta\varphi = f_2(\omega)$.

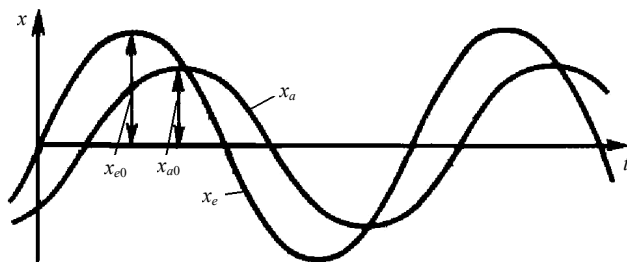


Рис. 1.9. Возможный отклик на периодический синусоидальный тестовый сигнал

Эти зависимости используются в качестве динамических частотных характеристик измерительных преобразователей и средств измерений. Часто динамические характеристики представляют графически в логарифмическом масштабе в зависимости от $\lg(\omega / \omega_0)$ (где ω_0 – собственная частота колебаний средства измерений): амплитудно-частотная характеристика – зависимость $\lg |x_{a0} / x_{e0}|$ от $\lg(\omega / \omega_0)$ и фазово-частотная характеристика – зависимость $\delta\varphi$ от $\lg(\omega / \omega_0)$.

При определении частотных динамических характеристик средств измерений оказывается удобным представление периодических функций в комплексной форме. С использованием формулы Эйлера

$$\cos \alpha + i \sin \alpha = \exp(i\alpha),$$

где $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица ($i^2 = -1$), входной и выходной периодические синусоидальные сигналы можно представить в экспоненциальной форме в виде комплексной величины:

$$x_e = x_{e0} [\cos \omega t + i \sin \omega t] = x_{e0} \exp(i\omega t), \quad (1.37)$$

$$\begin{aligned} x_a &= x_{a0} [\cos(\omega t + \delta\varphi) + i \sin(\omega t + \delta\varphi)] = x_{a0} \exp[i(\omega t + \delta\varphi)] = \\ &= x_{a0} \exp(i\omega t) \exp(i\delta\varphi). \end{aligned} \quad (1.38)$$

Такое представление удобно, поскольку позволяет достаточно просто выражать производную по времени и интеграл периодической функции:

$$\frac{dx}{dt} = i\omega x_0 \exp[i(\omega t + \delta\varphi)] = i\omega x, \quad (1.39)$$

$$\int x dt = \frac{1}{i\omega} x_0 \exp[i(\omega t + \delta\varphi)] = \frac{x}{i\omega}. \quad (1.40)$$

Если произвести замену $i\omega = p$ (где p – комплексная частота), то производная $dx / dt = px$. Аналогично можно записать для производных более высоких порядков: $d^2x / dt^2 = p^2x$, $d^3x / dt^3 = p^3x$ и т. д. Соответственно, интеграл $\int x dt = x / p$. Таким образом, дифференцирование уравнения колебаний сводится к умножению его на оператор p , а интегрирование – к умножению на оператор p^{-1} или делению на оператор p .

Иными словами, представление периодических сигналов в комплексной экспоненциальной форме дает возможность перейти от нелинейных преобразований дифференцирования и интегрирования к линейным преобразованиям умножения и деления.

Частотные характеристики – амплитудно-частотная и фазово-частотная – в совокупности образуют комплексный коэффициент передачи $G(i\omega)$, равный отношению комплексных выходной и входной величин:

$$G(i\omega) = \frac{x_a}{x_e} = \frac{x_{a0} \exp[i(\omega t + \delta\varphi)]}{x_{e0} \exp(i\omega t)} = \frac{x_{a0}}{x_{e0}} \exp(i\delta\varphi), \quad (1.41)$$

где модуль отношения действительных амплитуд в зависимости от частоты ω

$$|G(i\omega)| = \frac{|x_{a0}|}{|x_{e0}|} = f_1(\omega) \quad (1.42)$$

есть амплитудно-частотная характеристика, а зависимость аргумента этой функции от частоты $\delta\varphi(\omega) = f_2(\omega)$ – фазово-частотная характеристика.

Комплексный коэффициент передачи $G(i\omega)$ можно представить как в тригонометрической, так и обычной форме:

$$G(i\omega) = \operatorname{Re} G + i \operatorname{Im} G, \quad (1.43)$$

и изобразить графически на комплексной плоскости (рис. 1.10).

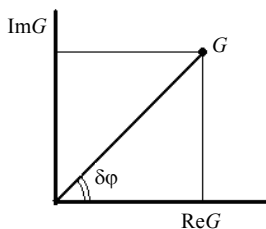


Рис. 1.10. Представление коэффициента передачи $G(i\omega)$ на комплексной плоскости

При этом модуль комплексного коэффициента передачи

$$|G| = \sqrt{(\operatorname{Re} G)^2 + (\operatorname{Im} G)^2}, \quad (1.44)$$

и сдвиг фаз

$$\delta\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} G}{\operatorname{Re} G}. \quad (1.45)$$

Если в уравнение (1.21), описывающее измерительный преобразователь с задержкой второго порядка, подставить выражения (1.37) для x_e и (1.38) для x_a , то в результате ряда преобразований получим:

$$a_2 \frac{d^2 x_a(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx_a(t)}{dt} + a_0 x_a(t) = K_p x_e(t),$$

$$x_e = x_{e0} \exp(i\omega t),$$

$$x_a = x_{a0} \exp(i\omega t) \exp(i\delta\varphi),$$

$$\frac{dx_a}{dt} = i\omega x_{a0} \exp(i\omega t) \exp(i\delta\varphi) = i\omega x_a,$$

$$\frac{d^2 x_a}{dt^2} = (i\omega)^2 x_{a0} \exp(i\omega t) \exp(i\delta\varphi) = -\omega^2 x_a,$$

$$x_a(-a_2\omega^2 + a_1i\omega + a_0) = K_p x_e, \quad (1.46)$$

и в соответствии с (1.41) определим комплексный коэффициент передачи преобразователя:

$$G(i\omega) = \frac{x_a}{x_e} = \frac{K_p}{-a_2\omega^2 + a_1i\omega + a_0}. \quad (1.47)$$

С использованием обозначений уравнения (1.22) комплексный коэффициент передачи преобразователя запишется в виде

$$G(i\omega) = \frac{K_p}{1 + i\omega 2T_1 - \omega^2 T_2^2}. \quad (1.48)$$

Переписав выражение (1.47) с использованием производной в операторной форме (или комплексной частоты $p = i\omega$), получаем передаточную функцию измерительного преобразователя с задержкой второго порядка:

$$G(p) = \frac{x_a}{x_e} = \frac{K_p}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (1.49)$$

описывающую его динамические свойства.

Передаточная функция $G(p)$ средства измерения, характеризуемого временной задержкой, является величиной, аналогичной передаточному коэффициенту K_p при статических измерениях.

С учетом выражений (1.22) и (1.48) передаточную функцию для измерительного преобразователя с временной задержкой второго порядка можно представить в виде

$$G(p) = \frac{x_a}{x_e} = \frac{K_p}{1 + 2T_1 p + T_2^2 p^2}. \quad (1.50)$$

При $p = 0$, что соответствует статическим измерениям, передаточная функция будет равна для линейного преобразователя его передаточному коэффициенту K_p .

Аналогично для измерительного преобразователя с временной задержкой первого порядка, переходный процесс которого описывается дифференциальным уравнением (1.38), получим выражения:

для комплексного коэффициента передачи

$$G(i\omega) = \frac{x_a}{x_e} = \frac{K_p}{1 + i\omega T}; \quad (1.51)$$

передаточной функции

$$G(p) = \frac{x_a}{x_e} = \frac{K_p}{1 + Tp}. \quad (1.52)$$

Модуль комплексного коэффициента передачи преобразователя с задержкой первого порядка (амплитудно-частотная характеристика):

$$|G(i\omega)| = \frac{K_p}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}. \quad (1.53)$$

С другой стороны, решением этого же дифференциального уравнения, описывающего звено задержки первого порядка, является переходная функция

$$h(t) = K_p \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right], \quad (1.54)$$

которая является одной из временных динамических характеристик.

К динамическим характеристикам средств измерений относятся также интервал рабочих частот, собственная (резонансная) частота колебаний самой системы при ее возбуждении в отсутствие внешних воздействий и добротность.

Интервалом рабочих частот называется диапазон частот входного сигнала, в пределах которого погрешность измерений не превышает допускаемого предела. При частоте входного сигнала, близкой к собственной частоте средства измерений (при $\omega_r \approx \omega_0$), имеет место явление резонанса, при котором возрастает амплитуда выходного сигнала. Добротность колебательной системы показывает, во сколько раз запасы энергии в системе больше, чем потери энергии за один период колебаний. Добротность Q любой колебательной системы определяется по формуле

$$Q = \frac{\omega_r W}{P_d},$$

где ω_r – резонансная циклическая частота колебаний; W – энергия, запасенная в колебательной системе; P_d – рассеиваемая мощность. Рассеивание мощности в электрической резонансной цепи обусловлено ее электросопротивлением, в объемных электромагнитных резонаторах – потерями в стенках резонатора (см. с. 85), в оптических резонаторах – на зеркалах (см. с. 98). Добротность колебательной системы равна умноженному на π числу полных колебаний, по истечении которых амплитуда уменьшается в e раз:

$$Q = \pi N_e.$$

Чем выше значение добротности, тем слабее затухание колебаний в системе, тем более четко проявляется резонанс, более узким является максимум амплитудно-частотной характеристики вблизи собственной частоты ω_0 . Добротность средства измерений показывает, во сколько раз амплитуда выходного сигнала при резонансе превышает амплитуду входного сигнала. Значение добротности зависит от параметров средства измерений.

Для повышения при необходимости инерционности измерительных приборов осуществляют демпфирование колебаний с применением специальных устройств, называемых демпферами.

Итак, динамические характеристики средств измерений можно подразделить на временные и частотные; временные характеристики определяются при использовании скачкообразных тестовых сигналов, частотные – при применении периодических тестовых сигналов.

Если соответствующее процессу измерений дифференциальное уравнение решают с использованием в качестве входной величины скачкообразной функции, то решением будет переходная функция $h(t)$. Если же в качестве входной величины использовать периодическую синусоидальную функцию, то можно получить частотную характеристику – комплексный коэффициент передачи $G(i\omega)$.

Расчет динамических характеристик средств измерений на основе блок-схем преобразования сигналов измерительной информации можно осуществлять практически так же, как и статических. При этом строятся физико-математическая модель и блок-схема сигналов измерительного устройства. Нелинейные передаточные звенья с передаточными функциями дифференцирования и интегрирования можно заменить с использованием комплексного операторного представления линейными. Далее можно с применением понятий путей P , контуров S и их значений по формуле, аналогичной (1.18) (см. подразд. 1.2.4), рассчитать передаточную функцию $G(p)$ и комплексный коэффициент передачи $G(i\omega)$ измерительного устройства:

$$G(p) = \frac{\sum_{k=1}^n P_k \left(1 - \sum_{i=1}^r S_i^* + \sum_{(i,j=1)}^s S_{(i,j)} - \dots \right)}{1 - \sum_{i=1}^m S_i + \sum_{(i,j=1)}^p S_{(i,j)} - \dots}, \quad (1.55)$$

где P_k – значения путей; S_i – значения контуров первого порядка; $S_{(i,j)}$ – значения контуров второго порядка; n – количество путей; m – количество контуров первого порядка; p – число контуров второго порядка; r – число контуров первого порядка, не относящихся к одному пути; s –

число контуров второго порядка, не относящихся к соответствующему пути; * – суммы контуров, не связанных на данном пути.

Частотные характеристики имеют преимущество перед временными при описании динамических свойств сложных систем, для которых известны передаточные функции отдельных элементов. В частности, использование частотных характеристик позволяет от нелинейных передаточных функций дифференцирования и интегрирования перейти к линейным.

В тех случаях, когда в состав средств измерений входят преобразователи на основе электрических цепей, содержащие реактивные элементы – конденсаторы, которые характеризуются электроемкостью, и катушки индуктивности (в предположении цепей с сосредоточенными параметрами), необходимо учитывать комплексный характер реактивных сопротивлений конденсаторов и катушек.

Падение напряжения на катушке индуктивности в цепи переменного тока обусловлено возникновением в катушке ЭДС самоиндукции:

$$U_L = \mathcal{E}_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI_L}{dt}.$$

В случае синусоидального переменного тока в соответствии с (1.39) это соотношение можно записать в виде

$$U_L = -i\omega LI_L = -pLI_L, \quad (1.56)$$

где $p = i\omega$ – комплексная частота переменного тока в электрической цепи. Соответственно получаем следующие линейные коэффициенты преобразования силы синусоидального переменного тока в напряжение и напряжения в силу тока на катушке индуктивности:

$$G_{I \rightarrow U}^L = -pL \text{ и } G_{U \rightarrow I}^L = -\frac{1}{pL}. \quad (1.57)$$

Конденсатор электроемкостью C в цепи синусоидального переменного тока периодически перезаряжается. Напряжение на обкладках конденсатора

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_C dt,$$

где q – заряд на обкладках; I_C – сила переменного тока в цепи.

В соответствии с (1.40) соотношение между I_C и U_C можно представить как

$$U_C = \frac{1}{i\omega C} I_C = \frac{1}{pC} I_C. \quad (1.58)$$

Коэффициенты преобразования синусоидального переменного тока в напряжение на конденсаторе и, соответственно, напряжения в силу тока можно представить в виде

$$G_{I \rightarrow U}^C = \frac{1}{pC} \text{ и } G_{U \rightarrow I}^C = pC. \quad (1.59)$$

Выражения (1.56) и (1.57) отображают закон Ома на участке цепи, обладающем индуктивностью; (1.58) и (1.59) – на участке цепи, обладающем электрической емкостью. И естественно, преобразование ток – напряжение на активном омическом сопротивлении определяется законом Ома: $I_R = U_R / R$.

Возможно также преобразование блок-схем сигналов измерительной информации в средствах измерений в динамическом режиме с применением передаточных функций последовательных и параллельных измерительных систем, систем с обратной связью. При этом учитывается зависимость сигналов от частоты $p = i\omega$.

Рассмотрим систему из двух последовательно включенных передаточных звеньев с передаточными функциями $G_1(p)$ и $G_2(p)$ (см. табл. 1.3). Измерительные преобразования в каждом из звеньев определяются выражениями:

$$x_a(p) = G_2(p)x_1(p);$$

$$x_1(p) = G_1(p)x_e(p),$$

откуда после подстановки получим

$$x_a(p) = G_1(p)G_2(p)x_e(p)$$

или

$$\frac{x_a(p)}{x_e(p)} = G_1(p)G_2(p) = G_H(p), \quad (1.60)$$

где $G_H(p)$ – передаточная функция системы последовательно соединенных преобразователей.

Полученный результат распространяется на любое число последовательно соединенных передаточных звеньев.

Запишем выражение (1.60) в виде комплексных коэффициентов передачи:

$$G_H(i\omega) = G_1(i\omega)G_2(i\omega). \quad (1.61)$$

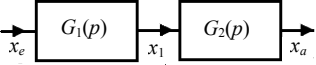
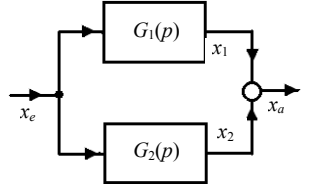
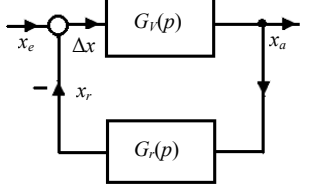
Поскольку модуль произведения двух комплексных чисел равен произведению их модулей, а аргумент произведения равен сумме аргументов сомножителей:

$$\begin{aligned}
 |G_1(i\omega)G_2(i\omega)| &= |G_1(i\omega)| \exp(i\delta\varphi_1) |G_2(i\omega)| \exp(i\delta\varphi_2) = \\
 &= |G_1(i\omega)| |G_2(i\omega)| \exp[i(\delta\varphi_1 + \delta\varphi_2)],
 \end{aligned}
 \quad (1.62)$$

то амплитудно-частотная характеристика (модуль комплексного коэффициента передачи) системы последовательно включенных звеньев равна произведению амплитудно-частотных характеристик самих звеньев, а фазово-частотная характеристика (аргумент комплексного коэффициента передачи) системы равна сумме фазово-частотных характеристик звеньев. Эти величины удобно определять путем графического перемножения и суммирования.

Таблица 1.3

Преобразования совокупности измерительных звеньев

Операция преобразования	Преобразуемая система	Передаточная функция преобразования
Преобразование последовательной цепи		$G_H(p) = G_1(p)G_2(p)$
Преобразование параллельной цепи		$G_P(p) = G_1(p) + G_2(p)$
Преобразование системы с отрицательной обратной связью		$G_R(p) = \frac{G_1(p)}{1 + G_1(p)G_2(p)}$

Определим передаточную функцию системы, образованной двумя параллельно включенными звеньями (см. табл. 1.3). В узле суммирования сигналов

$$x_a(p) = x_1(p) + x_2(p),$$

где $x_1(p) = G_1(p)x_e(p)$; $x_2(p) = G_2(p)x_e(p)$. Тогда

$$x_a(p) = [G_1(p) + G_2(p)]x_e(p),$$

и передаточная функция такой системы

$$G_p(p) = \frac{x_a(p)}{x_e(p)} = G_1(p) + G_2(p). \quad (1.63)$$

Полученный результат также может быть распространен на любое число параллельно включенных передаточных звеньев.

Подобным образом можно определить передаточную функцию $G_R(p)$ системы с обратной связью, содержащей два антипараллельно включенных передаточных звена (см. табл. 1.3). В случае отрицательной обратной связи и линейности передаточной функции $G_V(p)$ имеем

$$x_a(p) = G_V(p)\Delta x(p) = G_V(p)[x_e(p) - x_r(p)].$$

Так как

$$x_r(p) = G_r(p)x_a(p),$$

то получим

$$\begin{aligned} x_a(p) &= G_V(p)[x_e(p) - G_r(p)x_a(p)] = \\ &= G_V(p)x_e(p) - G_V(p)G_r(p)x_a(p); \\ x_a(p)[1 + G_V(p)G_r(p)] &= G_V(p)x_e(p). \end{aligned}$$

Откуда передаточная функция системы с отрицательной обратной связью

$$G_R(p) = \frac{x_a(p)}{x_e(p)} = \frac{G_V(p)}{1 + G_V(p) \cdot G_r(p)}. \quad (1.64)$$

В случае положительной обратной связи знак «+» в знаменателе выражения (1.64) меняется на обратный знак «-».

При измерениях постоянных величин, для того чтобы правильно отсчитывать измеренное значение, важно знать только время успокоения или время T_E установления измерительного устройства.

При динамических измерениях изменяющихся во времени величин необходимо знать граничную частоту изменения измеряемой величины ν_g . Зависимость между верхней граничной частотой изменения измеряемой величины и временем установления средства измерений определяется теоремой отсчетов (без доказательства):

$$\nu_g = \frac{\omega_g}{2\pi} \leq \frac{1}{2T_E}, \quad (1.65)$$

т. е. невозможно измерять величины, частота изменения которых во времени превышает граничное значение $\nu_g = 1 / (2T_E)$, где T_E – время установления измерительного устройства.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Приведите классификацию динамических характеристик средств измерений.
2. Перечислите полные динамические характеристики средств измерений. Какие из них относятся к временным, а какие – к частотным?
3. Назовите частные динамические характеристики средств измерений.
4. Запишите дифференциальные уравнения, описывающие динамические измерения преобразователями с временной задержкой первого и второго порядков.
5. Каков смысл переходной функции (характеристики) измерительного преобразователя? Каков смысл импульсной переходной функции (характеристики)?
6. В чем состоит различие между переходными характеристиками измерительных преобразователей с временной задержкой первого и второго порядков?
7. Перечислите частотные динамические характеристики средств измерений. Уясните смысл каждой из характеристик.
8. Каким образом использование частотных характеристик позволяет от нелинейных передаточных функций дифференцирования и интегрирования перейти к линейным?
9. Выведите выражения для линейных передаточных функций элементов преобразователя на основе электрической цепи переменного тока.
10. Запишите формулу для расчета динамических характеристик средств измерений на основе блок-схем сигналов. Поясните смысл величин, входящих в формулу.
11. Выведите соотношения для преобразования блок-схем сигналов средств измерений с применением передаточных функций последовательных и параллельных измерительных систем, систем с обратной связью.

1.3. Измерительные системы и их основные элементы

Измерительная система – средство измерений, представляющее собой в общем случае совокупность измерительных приборов, измерительных преобразователей, мер, измерительных коммутаторов, линий связи, цифровых и аналоговых вычислительных устройств. При этом перечисленные элементы измерительной системы объединены общим алгоритмом функционирования для получения данных о величинах, характеризующих свойства и состояние исследуемого объекта.

Структурной единицей измерительной системы, осуществляющей законченный цикл измерительных преобразований до ввода информации

в регистрирующее или вычислительное устройство, является измерительный канал. В состав измерительного канала входят измерительные цепи. В зависимости от способа сочетания измерительных каналов различают измерительные системы последовательного действия, параллельной и последовательно-параллельной структуры.

В измерительных системах последовательного действия (сканирующих измерительных системах) с использованием, как правило, единственного измерительного канала осуществляется последовательное во времени измерение однородных физических величин, разнесенных в пространстве (путем «обегания» первичным измерительным преобразователем точек, в которых выполняются измерения).

В измерительных системах параллельной структуры измерение разнородных физических величин осуществляется непрерывно во времени при помощи индивидуального для каждой величины измерительного канала; причем выходной сигнал каждого канала может поступать на общее регистрирующее или вычислительное устройство.

В измерительных системах последовательно-параллельной структуры индивидуальными для каждой из измеряемых величин являются только первичные измерительные преобразователи и начальные участки линий связи. Промежуточные преобразования осуществляются общей частью системы, подключаемой периодически или в соответствии с выбранной программой к параллельным участкам измерительных каналов с помощью измерительного коммутатора. Возможны и смешанные варианты указанных структур.

Измерительные системы используются также в составе более сложных структур – информационно-измерительных систем и систем управления. Измерительные системы управления выполняют функции контроля, диагностики, распознавания образов, автоматического управления научными экспериментами и технологическими процессами. Информационно-измерительной системой называют совокупность функционально объединенных средств измерений, вычислительной техники и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту, в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления. Измерительные системы, перестраиваемые в зависимости от изменения измерительной задачи, называют гибкими.

В настоящее время практически все измерительные системы являются компьютерно-измерительными или измерительно-вычислительными комплексами, в которых используется согласование

обычных средств измерений с компьютером с применением специальных электронных аналого-цифровых преобразователей для преобразования аналоговых сигналов измерительной информации в цифровую форму. Такие системы позволяют осуществлять эффективный сбор измерительной информации, ее обработку, анализ и хранение, а также управление процессом измерений с применением компьютера и тем самым интенсифицировать процесс измерений.

1.3.1. Согласование измерительных преобразователей электрических сигналов

Начальным звеном любого измерительного канала является первичный измерительный преобразователь. Принципы преобразования, а также схема и конструктивная реализация первичного измерительного преобразователя зависят не только от измеряемой величины, но и от вида вторичного сигнала, отображающего эту величину.

Принципы действия измерительных преобразователей связаны с преобразованием одного вида энергии в другой. Выходной величиной измерительного преобразователя часто является электрическая величина. Причем преобразование измеряемой входной величины в электрическую выходную величину имеет место и при измерении неэлектрических величин. Достоинствами таких преобразований являются: возможность измерения с применением электронных усилителей очень слабых электрических сигналов; возможность передачи измеренной величины на расстояние, а следовательно, и дистанционного управления процессом измерений; достаточно высокая точность, малая инерционность и быстрота электрических измерений.

Параметры измерительных преобразователей в составе средства измерений. Прибор для измерения той или иной физической величины путем преобразования ее в электрическую величину, как правило, состоит из ряда отдельных измерительных преобразователей.

В случае их последовательного соединения общая чувствительность прибора равна произведению чувствительностей всех звеньев (см. подразд. 1.2.2).

Оптимальный режим работы определяется также и по эффективности преобразования входной мощности в выходную мощность для каждого звена.

Рассмотрим прибор, представляющий собой измерительную цепь, состоящую из двух звеньев (двух измерительных преобразователей Пр_1 и Пр_2) (рис. 1.11). Эффективность преобразования первого звена Пр_1 : $\xi_1 = P_2 / P_1$, где P_2 – полная мощность на выходе преобразователя; P_1 – полная мощность сигнала на входе преобразователя (на входе прибора).

Эффективность преобразования второго звена Пр_2 : $\xi_2 = P_z / P_2$, где P_z – полная мощность на выходе преобразователя Пр_2 , т. е. на выходе прибора; P_2 – полная мощность сигнала на входе преобразователя Пр_2 , равная мощности на выходе преобразователя Пр_1 . Общая эффективность преобразования прибора определяется произведением эффективностей отдельных звеньев ($\xi = \xi_1 \xi_2$ – для двух измерительных звеньев и $\xi = \prod_{i=1}^N \xi_i$ – для произвольного числа звеньев).

Следовательно, для выбора оптимального режима работы прибора необходимо достижение максимально возможных значений чувствительностей и эффективностей преобразования отдельных звеньев.

Еще одним параметром измерительных преобразователей является набор характеристических сопротивлений, к которым относятся внутреннее сопротивление, а также входное и выходное сопротивления (входной и выходной импеданс) преобразователя.

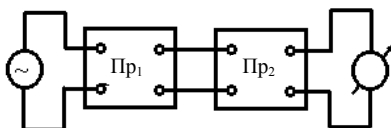


Рис. 1.11. Последовательное соединение двух измерительных преобразователей

Входное сопротивление (входной импеданс) преобразователя $Z_e = U_e / I_e$, где U_e – напряжение входного сигнала; I_e – сила тока, текущего по входной цепи. Выходное сопротивление (выходной импеданс) преобразователя $Z_a =$

$= U_{x.x} / I_{к.з.}$, где $U_{x.x}$ – напряжение холостого хода, измеряемое на выходных клеммах при пренебрежимо малом выходном токе; $I_{к.з.}$ – сила тока короткого замыкания (при замкнутых накоротко выходных клеммах).

Кроме того, эффективность преобразования звена зависит от его качества, которое характеризуется отношением полного сопротивления холостого хода к сопротивлению короткого замыкания:

$$K = \sqrt{\frac{Z_{x.x}}{Z_{к.з.}}}, \quad (1.66)$$

где $Z_{x.x}$ – сопротивление (импеданс) холостого хода, измеренное на выходных клеммах звена при разомкнутых входных клеммах; $Z_{к.з.}$ – сопротивление короткого замыкания, измеренное также на выходных клеммах, но уже при коротком замыкании входных клемм.

Однако достижение наибольшей эффективности преобразования прибора зависит не только от свойств каждого звена, но и от соответствующего согласования звеньев (измерительных преобразователей), составляющих прибор. Причем условия согласования зависят от свойств согласуемых звеньев.

Параметрические и генераторные измерительные преобразователи. По виду выходной электрической величины измерительные преобразователи подразделяют на параметрические и генераторные.

Выходной величиной параметрического измерительного преобразователя является пассивный параметр электрической цепи – сопротивление, емкость, индуктивность и т. п. Применение таких преобразователей в измерительных системах требует вспомогательных источников питания. Например, можно измерять температуру с использованием зависимости сопротивления проводника или полупроводника от температуры (с применением терморезисторов или термисторов); однако само сопротивление нельзя измерить без дополнительного источника питания.

Выходной величиной генераторного измерительного преобразователя является активная электрическая величина – электродвижущая сила, сила тока и т. п. Для работы генераторных преобразователей не требуется вспомогательного источника питания. Например, при измерении температуры с помощью термопары определяется термоЭДС самой термопары, значение которой зависит от измеряемой температуры.

К генераторным первичным измерительным преобразователям относятся пьезоэлектрические, электродинамические, термоэлектрические и фотоэлектрические, к параметрическим измерительным преобразователям – резистивные, емкостные, индуктивные, элементы на основе эффектов Холла и магнетосопротивления.

Определим условия согласования измерительных преобразователей, включаемых последовательно, для достижения максимальной эффективности преобразования по мощности при передаче сигнала от преобразователя к преобразователю.

Согласование генераторных измерительных преобразователей. Вначале рассмотрим последовательное соединение двух измерительных преобразователей, один из которых является генераторным. На рис. 1.12 представлена эквивалентная схема такой измерительной цепи.

Эквивалентная схема любого устройства используется как способ представления принципа его действия; при этом в схеме не обязательно отражены реальные компоненты рассматриваемого устройства и соединения между ними.

Функциональная схема средства измерения отображает функции, которые производятся в измерительном устройстве. Связи между функциональными блоками на ней, в отличие от связей на блок-схеме преобразования сигналов, не указывают направление передачи сигнала. При этом каждая из функций может осуществляться одним или несколькими измерительными звеньями, имеющими различную физическую природу.

Будем полагать, что первый преобразователь Пр_1 измерительной цепи является генераторным и его можно характеризовать генерируемой ЭДС \mathcal{E} , а также полным внутренним сопротивлением (импедансом) Z_i , которое является выходным сопротивлением преобразователя (рис. 1.12). Мощность, развиваемая генераторным преобразователем в режиме короткого замыкания, т. е. расходуемая лишь на его внутреннем сопротивлении Z_i :

$$P_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}^2}{Z_i}, \quad (1.67)$$

где \mathcal{E} – выходная ЭДС преобразователя, зависящая от входной величины x_e . Мощность короткого замыкания является одной из характеристик генераторного преобразователя.

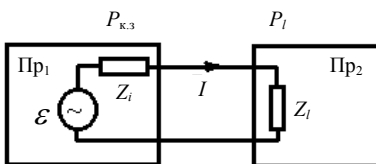


Рис. 1.12. Эквивалентная схема измерительной цепи, включающей генераторный измерительный преобразователь Пр_1

Мощность, передаваемая генераторным преобразователем следующему преобразователю, имеющему входное сопротивление (импеданс) Z_l (сопротивление нагрузки для первого преобразователя):

$$P_l = I^2 Z_l.$$

Эффективность преобразования мощности при передаче сигнала измерительной информации от генераторного преобразователя к следующему преобразователю измерительной цепи $\xi = P_l / P_{\text{к.з}}$.

В частности, если сопротивления преобразователя и нагрузки чисто активные ($Z_i = R_i$, $Z_l = R_l$), то в соответствии с законом Ома сила тока в измерительной цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_i + R_l}.$$

Сила тока и мощность короткого замыкания (при $R_l \rightarrow 0$) равны соответственно: $I_{\text{к.з}} = \mathcal{E} / R_i$ и $P_{\text{к.з}} = \mathcal{E}^2 / R_i$.

Мощность, выделяемая на входном сопротивлении преобразователя Пр_2 (сопротивлении нагрузки R_l для преобразователя Пр_1):

$$P_l = I^2 R_l = \frac{\mathcal{E}^2}{(R_l + R_i)^2} R_l = \frac{\mathcal{E}^2}{R_i} \frac{R_l R_i}{(R_l + R_i)^2} = \xi P_{\kappa.3}. \quad (1.68)$$

Зависимость мощности P_l , передаваемой от генераторного преобразователя к следующему, от входного сопротивления R_l последнего характеризуется максимумом, который достигается при условии $R_l = R_i$, т. е. когда входное сопротивление второго преобразователя совпадает по значению с выходным внутренним сопротивлением генераторного преобразователя. При $R_l = 0$ $P_l = 0$, а при $R_l \rightarrow \infty$ сила тока $I \rightarrow 0$ и $P_l \rightarrow 0$. Максимальное значение мощности $P_l^{\max} = \mathcal{E}^2 / 4R_i$.

Следовательно, эффективность преобразования мощности сигнала генераторного преобразователя при активном характере сопротивлений преобразователей

$$\xi = \frac{P_l}{P_{\kappa.3}} = \frac{R_l R_i}{(R_l + R_i)^2} = \frac{R_l / R_i}{(1 + R_l / R_i)^2} = \frac{a}{(1 + a)^2} \quad (1.69)$$

является функцией отношения сопротивлений $a = R_l / R_i$ и не зависит от значений этих сопротивлений. В этом случае эффективность преобразования принимает максимальное значение $\xi_m = 1/4$ при $a = 1$, т. е. при $R_l = R_i$ (рис. 1.13).

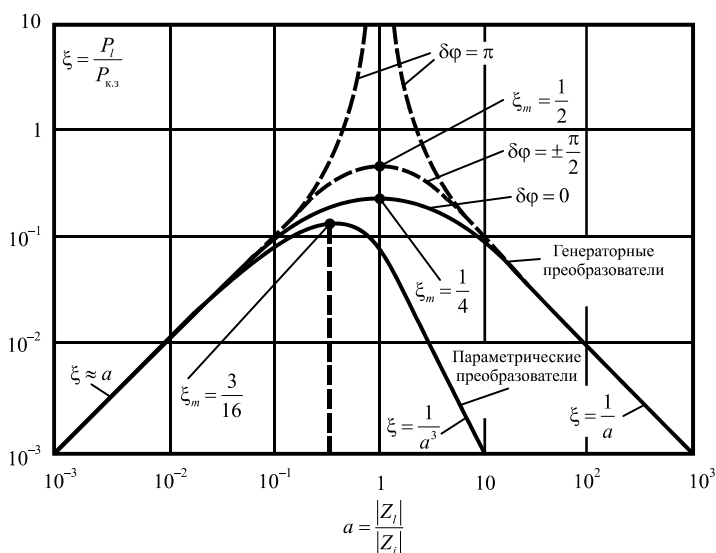


Рис. 1.13. Условия согласования генераторных и параметрических измерительных преобразователей

В случае когда согласуемые сопротивления Z_i и Z_l являются комплексными и измерения осуществляются на переменном токе, под эффективностью преобразования $\xi = P_l / P_{\text{к.з}}$ следует понимать отношение полных мощностей. При этом для значений $a = |Z_l| / |Z_i|$, сильно отличающихся от единицы, зависимость $\xi(a)$ практически не отличается от полученной для активных сопротивлений. Однако значение максимума $\xi(a)$ зависит от соотношения фаз комплексных сопротивлений Z_i и Z_l . При одинаковом характере сопротивлений (оба индуктивные или оба емкостные) $\varphi_i = \varphi_l$ ($\delta\varphi = 0$) зависимости $\xi(a)$, полученные для компонентов Z_i и Z_l импеданса и активных сопротивлений, полностью совпадают. При наличии между комплексными сопротивлениями Z_i и Z_l разности фаз $\delta\varphi = \pm \pi / 2$ (одно сопротивление активное, второе – реактивное) максимальное значение $\xi_m = 1 / 2$, т. е. увеличивается в 2 раза. При $\varphi_i = -\varphi_l$ ($\delta\varphi = \pi$), т. е. при одном – емкостном, а другом – индуктивном сопротивлении, имеет место резонансное возрастание значения ξ_m (рис. 1.13).

Максимальная мощность в нагрузке генераторного преобразователя, а следовательно, и максимум эффективности ξ преобразования достигаются при $a = 1$, или при $|Z_l| = |Z_i|$. При этом необходимо обратить внимание на то, что максимальную мощность желательно получить именно в нагрузке, поэтому сопротивление подводящих проводов необходимо включать в состав внутреннего сопротивления преобразователя.

При значениях параметра a , сильно отличающихся от единицы, эффективность преобразования падает, что приводит к снижению чувствительности при передаче сигнала. Поскольку максимум зависимости $\xi(a)$ достаточно пологий, то на практике согласование обеспечивается в диапазоне значений параметра a от 0,3 до 5. При условии оптимального согласования преобразователей энергетический КПД генераторного преобразователя

$$\eta = \frac{P_l}{P_f} = \frac{I^2 R_l}{I^2 (R_i + R_l)} = \{R_l = R_i\} = \frac{R_l}{2R_l} = 0,5,$$

где P_f – полная мощность, выделяемая во всей измерительной цепи.

Согласование параметрических измерительных преобразователей. При работе с параметрическими преобразователями используются измерительные цепи с питанием как переменным, так и постоянным током. Рассмотрим свойства параметрических преобразователей на примере цепей постоянного тока.

На рис. 1.14, а представлена схема соединения параметрического преобразователя Пр₁ с последующим преобразователем Пр₂. Здесь постоянная величина \mathcal{E} – ЭДС источника питания параметрического изме-

рительного преобразователя Пр_1 ; R_0 – его внутреннее сопротивление при отсутствии сигнала, подаваемого на вход преобразователя; ΔR – изменение сопротивления преобразователя под воздействием входного сигнала. Сопротивление параметрического измерительного преобразователя является функцией измеряемой величины: $R_i = f(x_e)$, и может быть выражено как

$$R_i = R_0 \pm \Delta R(x_e). \quad (1.70)$$

Входное сопротивление R_i преобразователя Пр_2 является сопротивлением нагрузки для параметрического преобразователя Пр_1 .

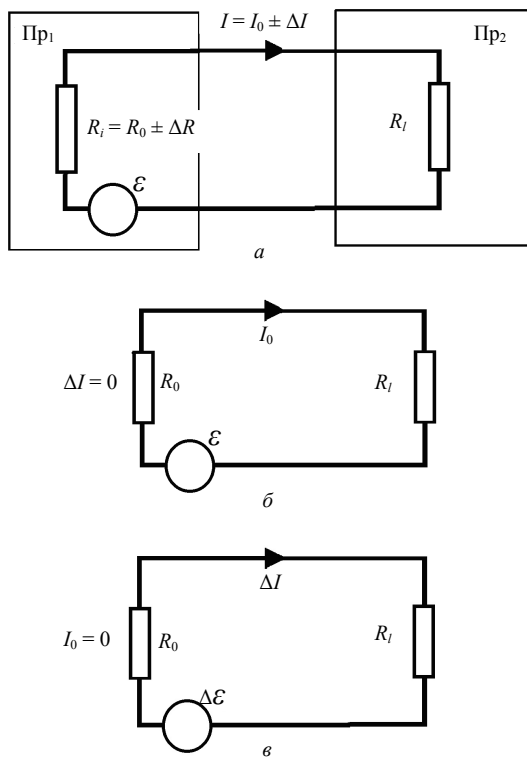


Рис. 1.14. Эквивалентные схемы согласования параметрического измерительного преобразователя и нагрузки

В отсутствии входного сигнала x_e $\Delta R = 0$ и сила тока в измерительной цепи равна постоянному значению I_0 . Эквивалентная схема соединения имеет вид, представленный на рис. 1.14, б.

При подаче на вход преобразователя Пр_1 сигнала измерительной информации x_e внутреннее сопротивление преобразователя изменяется на величину $\Delta R(x_e)$. Предположим, что соответствующее изменение ΔI силы тока в измерительной цепи происходит под действием некоторого дополнительного источника тока с ЭДС, равной $\Delta \mathcal{E}$. При таком рассмотрении вводится эквивалентный генератор ЭДС $\Delta \mathcal{E}$, заменяющий действие ΔR . Эквивалентная схема соединения представлена на рис. 1.14, в. Ток силой I_0 не несет информации о входном сигнале, и можно положить $I_0 = 0$. Информация отображается током ΔI .

Определим соотношение между ΔR и ΔI . В общем случае, в соответствии с законом Ома, сила тока в измерительной цепи равна

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_i + R_l}.$$

Логарифмируя предыдущее выражение:

$$\ln I = \ln \mathcal{E} - \ln(R_i + R_l),$$

затем дифференцируя с учетом, что $\mathcal{E} = \text{const}$ и $R_l = \text{const}$:

$$\frac{dI}{I} = \frac{d\mathcal{E}}{\mathcal{E}} - \frac{d(R_i + R_l)}{R_i + R_l} = -\frac{dR_i}{R_i + R_l},$$

и переходя от бесконечно малых к конечным приращениям, с учетом обозначений рис. 1.14, получим

$$\frac{\Delta I}{I} = -\frac{\Delta R}{R_0 + R_l}.$$

Если $\Delta R \ll R_0$, то $I \approx I_0$ и

$$\Delta I = -\frac{I_0 \Delta R}{R_0 + R_l}. \quad (1.71)$$

В соответствии с законом Ома, из (1.71) получаем следующее выражение для ЭДС эквивалентного генератора:

$$\Delta \mathcal{E} = -I_0 \Delta R. \quad (1.72)$$

Выражение (1.72) отображает теорему об эквивалентном генераторе: действие приращения сопротивления ΔR в цепи с силой тока I_0 эквивалентно действию генератора с ЭДС $\Delta \mathcal{E} = -I_0 \Delta R$.

Рассчитаем условия согласования параметрического измерительного преобразователя с последующим. Мощность, выделяемая на сопротивлении нагрузки при прохождении сигнала,

$$P_l = (\Delta I)^2 R_l = \frac{(\Delta \mathcal{E})^2}{(R_0 + R_l)^2} R_l = \frac{(\Delta \mathcal{E})^2}{R_0} \frac{R_0 R_l}{(R_0 + R_l)^2}. \quad (1.73)$$

В свою очередь, мощность, выделяемая при прохождении сигнала на внутреннем сопротивлении преобразователя Пр₁ (мощность короткого замыкания):

$$\begin{aligned} P_{\kappa.3} &= \frac{(\Delta \mathcal{E})^2}{R_0} = \frac{I_0^2 (\Delta R)^2}{R_0} = \frac{(\Delta R)^2}{R_0^2} R_0 I_0^2 = \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 R_0 \frac{\mathcal{E}^2}{(R_0 + R_l)^2} = \\ &= \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 \frac{\mathcal{E}^2}{R_0} \frac{R_0^2}{(R_0 + R_l)^2} = \varepsilon_R^2 P_{i \text{ доп}} \frac{R_0^2}{(R_0 + R_l)^2}, \end{aligned} \quad (1.74)$$

где $\varepsilon_R = \Delta R / R_0$ – относительное изменение сопротивления параметрического преобразователя при прохождении сигнала; $P_{i \text{ доп}} = \mathcal{E}^2 / R_0$ – допустимая мощность рассеяния на внутреннем сопротивлении преобразователя Пр₁.

Поскольку источники питания параметрических преобразователей, как правило, обладают достаточным запасом мощности, то мощность, которая подается на преобразователь, ограничивается не возможностями источника, а условиями работы преобразователя, т. е. допустимой мощностью рассеяния $P_{i \text{ доп}}$. Характеристиками параметрических преобразователей являются допустимая мощность рассеяния $P_{i \text{ доп}}$, его начальное внутреннее сопротивление R_0 и относительное изменение сопротивления $\varepsilon_R = \Delta R / R_0$ при прохождении сигнала измерительной информации.

Подставляя в определение эффективности преобразования выражения (1.73) для P_l и (1.74) для $P_{\kappa.3}$, получим

$$\begin{aligned} \xi_{\text{п}} &= \frac{P_l}{P_{\kappa.3}} = \left(\frac{(\Delta \mathcal{E})^2}{R_0} \frac{R_0 R_l}{(R_0 + R_l)^2} \right) : \left(\varepsilon_R^2 \frac{\mathcal{E}^2}{R_0} \frac{R_0^2}{(R_0 + R_l)^2} \right) = \\ &= \frac{(\Delta \mathcal{E})^2}{R_0} \frac{R_l}{\mathcal{E}^2} \frac{1}{\varepsilon_R^2} = \frac{(\Delta \mathcal{E})^2}{R_0^2} R_l \frac{R_0}{\mathcal{E}^2} \frac{1}{\varepsilon_R^2} = \frac{P_l}{P_{i \text{ доп}}} \frac{1}{\varepsilon_R^2}. \end{aligned} \quad (1.75)$$

Эффективность преобразования мощности параметрического преобразователя определяется соотношением (1.75) и зависит от допустимой мощности рассеяния на его внутреннем сопротивлении $P_{i \text{ доп}}$ и относительного изменения сопротивления преобразователя $\varepsilon_R = \Delta R / R_0$ при прохождении сигнала, а также от мощности P_l , выделяемой при прохождении сигнала на сопротивлении нагрузки. Условием оптимального

согласования сопротивлений параметрического преобразователя и нагрузки при их последовательном включении является $R_l = R_0 / 3$ ($a = 1 / 3$). Максимальное значение эффективности преобразователя при этом составляет $\xi_m = 3 / 16$ (см. рис. 1.13). Максимум кривой в зависимости от $\xi_{\text{п}}(a)$ более резкий, чем в случае генераторного преобразователя; поэтому условия согласования параметрического преобразователя должны выполняться более строго; допускается изменение параметра a в 1,5–2 раза.

В отличие от генераторных согласование параметрических преобразователей должно осуществляться с учетом двух факторов: необходимо обеспечить выделение максимальной мощности в самом преобразователе для создания максимально возможного значения ЭДС $\Delta \mathcal{E}$ эквивалентного генератора и обеспечить эффективную передачу мощности от ЭДС $\Delta \mathcal{E}$ нагрузке.

При условии оптимального согласования преобразователей энергетический КПД параметрического преобразователя равен

$$\eta = \frac{P_l}{P_f} = \frac{(\Delta I)^2 R_l}{(\Delta I)^2 (R_0 + R_l)} = \{R_0 = 3R_l\} = \frac{R_l}{4R_l} = 0,25, \quad (1.76)$$

т. е. в два раза меньше КПД генераторного преобразователя.

Несмотря на невысокие значения КПД преобразователей, при условиях их согласования в измерительных системах достигается наиболее эффективное преобразование мощности сигналов измерительной информации.

Во многих электронных схемах, в том числе с применением усилителей, требуется согласование преобразователей с целью оптимальной передачи напряжения. Для наиболее оптимальной передачи напряжения необходимо (см. эквивалентную схему на рис. 1.13), чтобы напряжение U , подаваемое на вход преобразователя Пр₂, было почти равным эквивалентной ЭДС \mathcal{E} генераторного преобразователя Пр₁. Получим соотношение между этими величинами. Сила тока в измерительной цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{Z_i + Z_l} = \frac{U}{Z_l}.$$

Откуда

$$U = \frac{Z_l}{Z_i + Z_l} \mathcal{E}. \quad (1.77)$$

Для наиболее оптимальной эффективности преобразования напряжения (для выполнения условия $U \approx \mathcal{E}$) необходимо, чтобы выходное сопротивление Z_i преобразователя Пр₁ было во много раз меньше входного сопротивления Z_l преобразователя Пр₂. На практике нужно, чтобы $Z_l > 10Z_i$.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Приведите определение измерительной системы и классификацию измерительных систем.
2. Дайте определения измерительной системы управления, информационно-измерительной и компьютерно-измерительной систем.
3. Приведите классификацию измерительных преобразователей, входящих в состав измерительных систем.
4. Приведите примеры известных Вам измерительных преобразователей. Проанализируйте преобразование видов энергии в каждом из них.
5. Сопоставьте определения и смысл понятий: блок-схема преобразования сигналов, функциональная схема и эквивалентная схема средства измерений.
6. Уясните смысл основных параметров, характеризующих работу измерительных преобразователей: эффективность преобразования мощности измерительного звена; эффективность преобразования мощности при передаче сигнала от преобразователя к преобразователю; КПД преобразователя; напряжение холостого хода; сопротивление холостого хода; сила тока короткого замыкания; сопротивление короткого замыкания; входное сопротивление; выходное сопротивление.
7. Приведите вывод условия согласования по мощности генераторных измерительных преобразователей.
8. Проанализируйте зависимость эффективности преобразования генераторных измерительных преобразователей от значения и характера сопротивления нагрузки.
9. Сформулируйте теорему об эквивалентном генераторе.
10. Запишите условия согласования по мощности параметрических измерительных преобразователей.
11. Каково условие согласования измерительных преобразователей для оптимальной эффективности преобразования напряжения?

1.3.2. Усилители сигналов измерительной информации

В измерительных устройствах нередко возникает необходимость в усилении сигналов измерительной информации, имеющих малую интенсивность. Для этого используются усилители, чаще всего электрических сигналов.

Усилитель электрических сигналов (электромагнитных колебаний) – устройство, предназначенное для увеличения интенсивности периодического изменения сигналов без изменения их частотного спектра и фазовых соотношений за счет энергии вспомогательного источника постоянного тока либо за счет энергии других электромагнитных колебаний.

Усилители могут использоваться как для усиления электрических сигналов измерительной информации, так и для других их преобразований (операционные усилители). Усилители являются наиболее универсальными электронными устройствами, которые в той или иной форме используются в измерительных цепях в качестве вторичных измерительных преобразователей. Поскольку они являются измерительными преобразователями, то должны обладать стабильными метрологическими характеристиками.

На вход усилителя подается исходный сигнал от внешнего источника (предыдущего измерительного преобразователя), а на выходе получается усиленный выходной сигнал. Структурная схема процесса усиления электрических колебаний представлена на рис. 1.15.

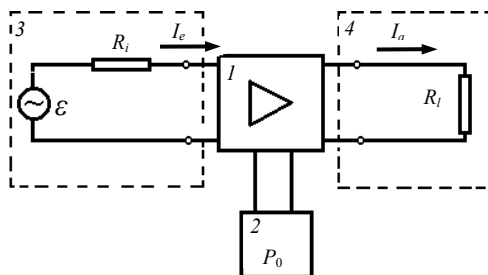


Рис. 1.15. Структурная схема усиления электрических сигналов:

1 – усилитель; 2 – источник питания; 3 – источник сигнала;

4 – нагрузка; \mathcal{E} – ЭДС источника усиливаемого сигнала;

R_i – внутреннее сопротивление источника сигнала;

R_l – сопротивление нагрузки; I_e – сила тока на входе усилителя;

I_a – сила тока на выходе усилителя; P_0 – мощность источника питания

Процесс усиления электрических колебаний осуществляется за счет воздействия усиливаемых колебаний на источник питания через усилительный элемент. В качестве усилительного элемента может использоваться вакуумный триод, транзистор и другие устройства. При этом мощность P_0 источника питания существенно превышает мощность P_e источника усиливаемого сигнала (входную мощность). Часть мощности источника, отдаваемая во внешнюю цепь (в нагрузку), называется выходной мощностью.

Способность усилителя увеличивать интенсивность сигнала оценивается следующими параметрами: эффективностью преобразования мощности – $\xi = P_a / P_e$ (коэффициентом усиления по мощности); коэффициентом усиления по току – $V_I = I_a / I_e$ и коэффициентом усиления по напряжению – $V_U = U_a / U_e$.

Наряду с коэффициентами усиления усилители характеризуются полосой пропускаемых частот, коэффициентом допустимых искажений и другими параметрами. В зависимости от используемого способа усиления сигналов существуют электронные ламповые и транзисторные усилители, оптоэлектронные, а также магнитные усилители. Помимо элементной базы, усилители различают по виду входного усиливаемого сигнала: усилители переменного и постоянного напряжений и усилители постоянного тока. По полосе частот усиливаемых сигналов различают низкочастотные, высокочастотные и сверхвысокочастотные усилители. Если нижняя граничная частота полосы пропускаемых частот сколь угодно близка к нулю, то усилитель называется усилителем постоянного тока, если она отделена от нуля некоторым интервалом, то усилитель является усилителем переменного тока. В усилителях постоянного тока коэффициент усиления на низких частотах вплоть до значений частот, близких к нулю, остается примерно таким же, как и на средних частотах.

Электронные усилители электрических сигналов обычно выполняются на электронных лампах или транзисторах. Рассмотрим принцип действия усилителей электрических сигналов на основе вакуумного триода и транзистора. На рис. 1.16 приведены простейшие схемы усилителей напряжения, выполненных на вакуумном триоде и $n-p-n$ -транзисторе.

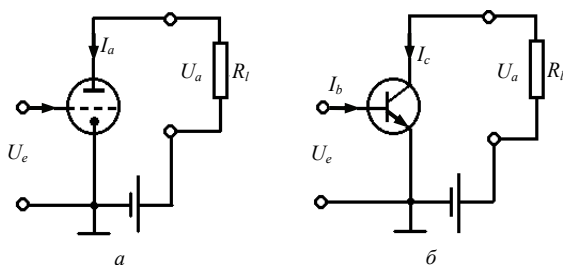


Рис. 1.16. Простейшие схемы усилителей электрических сигналов на основе:
а – вакуумного триода; б – транзистора

В схеме с электровакуумным прибором (рис. 1.16, а) усиление входного напряжения U_e , подаваемого на сеточный электрод, осуществляется за счет сильного влияния потенциала сетки на скорость движения эмиттирующихся из катода электронов к аноду и, следовательно, на значения силы анодного тока I_a . Значение переменного выходного напряжения U_a , равное падению напряжения на высокоомном сопротивлении нагрузки R_l ($U_a = I_a R_l$), значительно превышает значение входного напряжения U_e , за счет чего достигаются высокие значения коэффициента усиления

$V_U = U_a / U_e$. Типичное значение коэффициента усиления усилителя напряжения на основе вакуумного триода составляет около 30.

Принцип усиления электрических сигналов с применением транзисторных усилителей рассмотрим более подробно. Транзисторные усилители могут быть реализованы на основе биполярных транзисторов, а также транзисторов других типов.

Биполярный транзистор состоит из двух p - n -переходов, образованных слоями полупроводников с различными типами проводимости. В n - p - n -транзисторе (рис. 1.17) тонкий (меньше 1 мкм) слой полупроводника с дырочной проводимостью (проводимостью p -типа), называемый базой, расположен между двумя более толстыми слоями, обладающими электронной проводимостью (проводимостью n -типа), – эмиттером и коллектором.

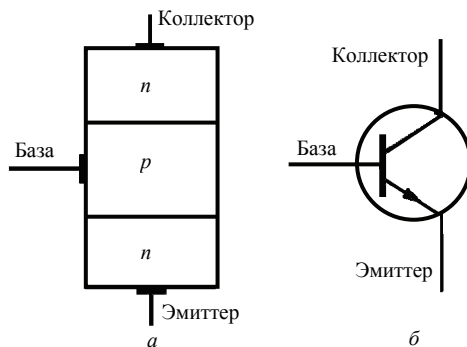


Рис. 1.17. Схема n - p - n -транзистора:
а – устройство; б – условное обозначение

Транзистор p - n - p -типа устроен аналогично, только материал базы в нем обладает электронной проводимостью, а материал коллектора и эмиттера – дырочной. Соответственно несколько отличается и его условное обозначение – изменено направление стрелки в схематическом обозначении эмиттера.

При включении в сеть на коллектор транзистора p - n - p -типа подается напряжение отрицательной полярности относительно эмиттера, а на коллектор транзистора n - p - n -типа – положительное напряжение. Основным рабочим состоянием транзистора в большинстве электрических схем является такое, при котором к эмиттерному p - n -переходу приложено напряжение в пропускном направлении, а к коллекторному – в запирающем.

На рис. 1.18 рассмотрен принцип действия n - p - n -транзистора. При отсутствии сигнала, подаваемого на базу транзистора (рис. 1.18, а), пе-

переход коллектор – база включен в запирающем направлении и имеющийся потенциальный барьер препятствует потоку основных носителей (ток в цепи коллектора равен нулю). При подаче положительного напряжения на базу (рис. 1.18, б) переход база – эмиттер становится смещенным в прямом пропускном направлении, а переход коллектор – база остается смещенным в обратном направлении. Благодаря смещению перехода база – эмиттер в прямом направлении электроны из эмиттера n -типа посредством диффузии проходят сквозь тонкий слой базы p -типа по направлению к обедненному носителями слою на переходе база – коллектор. Эти электроны, являющиеся неосновными носителями в области базы, достигнув обедненного слоя, переходят в коллектор, создавая тем самым в транзисторе коллекторный ток I_c . Поскольку слой базы очень тонкий и слабо легирован акцепторной примесью, то электроны в процессе диффузии через этот слой практически не рекомбинируют с дырками. Действие перехода база – эмиттер, смещенного в прямом направлении, напоминает открывание калитки и позволяет току протекать по цепи эмиттер – коллектор.

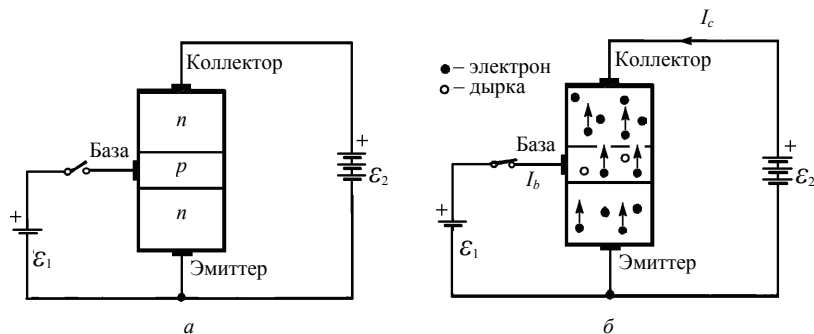


Рис. 1.18. Принцип действия n - p - n -транзистора:

а – при отсутствии сигнала, подаваемого на базу;

б – при подаче на базу положительного потенциала

В усилителе на транзисторе (рис. 1.16, б) входное напряжение U_e , приложенное к переходу база – эмиттер, вызывает увеличение тока базы, сила I_b которого зависит от сопротивления перехода база – эмиттер. Ток базы, в свою очередь, вызывает намного больший ток в цепи коллектора I_c , создающий падение напряжения $U_a = I_c R_l$ на сопротивлении нагрузки R_l , которое и является выходным напряжением усилителя. Коэффициент усиления усилителя по напряжению определяется соотношением $V_U = U_a / U_e$.

Коэффициент усиления измерительного усилителя не должен зависеть от частоты и амплитуды усиливаемого сигнала. Для улучшения

частотных характеристик усилителей (в определенном интервале рабочих частот) и повышения стабильности их работы (например, при изменении температуры) применяется отрицательная обратная связь. При этом часть выходного сигнала через специальную цепь подается также на вход усилителя. В результате на входе усилителя действуют два сигнала: исходный сигнал $x_{\text{вх}} = x_e$ и сигнал обратной связи $x_{\text{ос}} = \gamma x_a$, где γ – коэффициент обратной связи. Свойства и характеристики усилителей во многом определяются используемыми в них цепями обратной связи. Усилители с обратной связью применяются как для усиления электрических сигналов, так и для других их преобразований (см. подразд. 1.3.3).

Действие положительной и отрицательной обратной связи в передаточном звене с усилителем рассматривалось нами ранее (см. подразд. 1.2.3). Коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью рассчитывается по формуле (1.15):

$$K_y = \frac{K_{y0}}{1 + \gamma K_{y0}},$$

где $\gamma = U_{\text{ос}} / U_{\text{вых}} = U_b / U_a$ – коэффициент обратной связи, показывающий, какая часть выходного напряжения подается на вход в виде сигнала обратной связи.

При использовании в цепях обратной связи только активных элементов они являются частотно-независимыми, и коэффициент обратной связи представляет собой активную величину, не зависящую от частоты. В общем случае при наличии в цепях обратной связи активных и реактивных элементов коэффициент обратной связи является комплексной величиной и для него вводятся соответствующие обозначение и название: $G_r(p)$ – передаточная функция цепи обратной связи; однако в области средних частот его также можно считать величиной активной. Если функция $G_r(p) = \text{const}$, то она представляет собой коэффициент обратной связи γ .

При наличии в цепях обратной связи активных и реактивных элементов коэффициент усиления прямой цепи (усилителя без обратной связи), называемый внутренним коэффициентом усиления, обозначается V_v вместо K_{y0} ($K_{y0} \rightarrow V_v$). В этом наиболее общем случае передаточная функция усилителя с отрицательной обратной связью определяется по формуле

$$G_v(p) = \frac{V_v}{1 + G_r(p)V_v}. \quad (1.78)$$

В случае постоянства передаточной функции ее называют передаточным коэффициентом V (в усилителе обозначение V вместо K):

$$V = \frac{|x_a|}{|x_e|}.$$

Если входная и выходная величины однородны, например токи или напряжения, то V называют коэффициентом усиления:

$$V = \frac{V_v}{1 + \gamma V_v}. \quad (1.79)$$

Итак, при рассмотрении усилителей с обратной связью вводятся следующие обозначения:

- V_v – коэффициент усиления прямой цепи (усилителя без обратной связи);
- $G_r(p)$ – передаточная функция цепи обратной связи (при ее постоянстве представляет собой коэффициент обратной связи γ);
- $G_v(p)$ – передаточная функция усилителя с обратной связью (при ее постоянстве называют передаточным коэффициентом: $K \rightarrow V$);
- $V_U = U_2 / U_1 = U_a / U_e$ – коэффициент усиления усилителя с обратной связью по напряжению;
- $V_I = I_2 / I_1 = I_a / I_e$ – коэффициент усиления по току;
- Z_e – входное сопротивление (входной импеданс) усилителя с обратной связью; $Z_e = U_e / I_e$, где U_e – напряжение входного сигнала; I_e – сила тока, текущего по входной цепи;
- Z_a – выходное сопротивление (выходной импеданс); $Z_a = U_{x.x} / I_{к.з}$, где $U_{x.x}$ – напряжение холостого хода, измеряемое на выходных клеммах при пренебрежимо малом выходном токе; $I_{к.з}$ – сила тока короткого замыкания (при замкнутых накоротко выходных клеммах);
- Z'_e – входной импеданс усилителя без обратной связи.

1.3.3. Операционные усилители и преобразование сигналов измерительной информации на их основе

Широкое распространение в измерительной технике получили операционные усилители, представляющие собой дифференциальные усилители постоянного тока с высоким значением коэффициента усиления, большим входным и малым выходным сопротивлениями. Типичные значения коэффициента усиления без обратной связи $V_v = 2 \cdot (10^5 - 10^7)$, входного сопротивления $R_e = 2$ МОм, выходного сопротивления $R_a = 75$ Ом. При анализе работы схем с операционным усилителем используется понятие «идеальный операционный усилитель», у которого $V_v = \infty$, $R_{вх} = R_e = \infty$, $R_{вых} = R_a = 0$, что позволяет существенно упростить

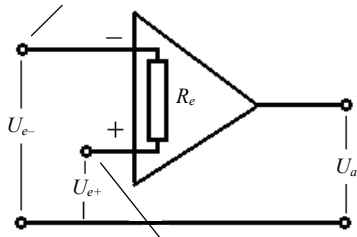
рассмотрение работы схем на операционных усилителях, благодаря использованию простых физико-математических моделей.

Операционные усилители почти всегда используются в схемах с отрицательной обратной связью, которая, благодаря высокому коэффициенту усиления, полностью определяет передаточный коэффициент передачи схемы с операционным усилителем.

Термин «операционный усилитель» происходит от первоначального применения таких усилителей для выполнения аналоговых математических операций. Помимо линейного режима работы – усиления – операционный усилитель при соответствующих схемах включения, в том числе с применением отрицательной обратной связи, может выполнять аналоговые математические операции суммирования, интегрирования, дифференцирования и др. Однако идеальный операционный усилитель является многофункциональным схемотехническим решением, он имеет множество применений помимо математических операций.

На рис. 1.19 представлена эквивалентная схема операционного усилителя. Резистор R_e имитирует входное сопротивление усилителя (на схемах обычно опускается). На неинвертирующий вход

Инвертирующий вход



Неинвертирующий вход

Рис. 1.19. Эквивалентная схема операционного усилителя

усилителя подается от источника напряжение, совпадающее по знаку с выходным напряжением. Выходное и входное напряжения на инвертирующем входе противоположны по знаку. Между инвертирующим и неинвертирующим входами образуется дифференциальный вход усилителя.

В исходном состоянии, при отсутствии входного сигнала, напряжения на входе и выходе равны нулю. При подаче входного сигнала выходное напряжение может изменяться как в сторону положительных, так и в сторону отрицательных значений. Для этой цели питание усилителя осуществляется с применением двух разнополярных источников, питающие напряжения которых одинаковы по величине, но противоположны по знаку.

На один из входов усилителя подают входное напряжение (входной сигнал), а на другой вход – постоянный, например нулевой, потенциал. Можно также на оба входа подавать два разных сигнала от двух отдельных источников. В обоих случаях на дифференциальный вход операционного усилителя оказывается поданным входной сигнал, равный разности сигналов, подаваемых на неинвертирующий и инвертирующий входы.

Современные операционные усилители, как правило, выполнены на транзисторах, входят в состав интегральных микросхем и могут включать несколько усилительных каскадов.

Рассмотрим основные принципы преобразования сигналов измерительной информации с применением операционных усилителей.

На рис. 1.20 показана схема инвертирующего операционного усилителя. Внешние резисторы R_1 и R_2 образуют цепь отрицательной обратной связи, резистор R_3 используется для компенсации влияния входного тока операционного усилителя на заземленный неинвертирующий вход. На инвертирующий вход подаются входной сигнал и сигнал обратной связи. При этом сигнал отрицательной обратной связи подается параллельно входному сигналу на один и тот же вход (параллельная обратная связь).

Для обеспечения высокого значения коэффициента усиления по напряжению ($V_U \rightarrow \infty$) необходимо, чтобы разность потенциалов между инвертирующим и неинвертирующим входами была бесконечно малой. С точки зрения сигнала, инвертирующий вход находится под тем же потенциалом, что и неинвертирующий вход, который заземлен. Поэтому точку на схеме, где резисторы R_1 и R_2 подключаются к инвертирующему входу, называют мнимой землей.

По этой причине все входное напряжение U_e оказывается приложенным к входному резистору R_1 , который представляет единственное сопротивление между входной клеммой и мнимой землей. Поэтому сила тока, создаваемого входным сигналом, $I_1 = U_e / R_1$. Сила тока в резисторе R_2 , включенном в цепь обратной связи между мнимой землей и выходом усилителя, на котором действует выходное напряжение противоположного знака $-U_a$, $I_2 = -U_a / R_2$.

Поскольку входное сопротивление усилителя бесконечно велико, то ток сигнала I_2 не может заходить в инвертирующий вход и $I_1 = I_2$, т. е.

$$-\frac{U_a}{R_2} = \frac{U_e}{R_1}.$$

Для инвертирующего усилителя в предположении его «идеальности» коэффициент преобразования

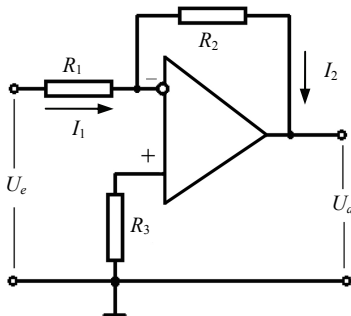


Рис. 1.20. Эквивалентная схема инвертирующего операционного усилителя

$$V = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (1.80)$$

Если $R_2 = R_1$, то $V = -1$, т. е. усилитель будет выполнять роль инвертора – устройства, изменяющего только знак входного сигнала без изменения его величины. Если же $R_2 / R_1 > 1$, то инвертированный сигнал будет усиливаться.

В неинвертирующем операционном усилителе (рис. 1.21) входной сигнал подается на неинвертирующий вход и сигнал на выходе имеет тот же знак, что и входной сигнал. Так как в операционном усилителе с отрицательной обратной связью потенциалы обоих входов одинаковы, то из равенства силы тока в резисторах R_1 и R_2 получим

$$\frac{U_e}{R_1} = \frac{U_a - U_e}{R_2}.$$

Откуда следует: $U_e R_2 = U_a R_1 - U_e R_1$ и $U_e (R_1 + R_2) = U_a R_1$.

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя

$$V = \frac{U_a}{U_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (1.81)$$

На рис. 1.22 показана эквивалентная схема сумматора сигналов – инвертирующего усилителя с двумя входами. Соотношения между токами и напряжениями на различных участках:

$$I = I_1 + I_2.$$

$$-\frac{U_a}{R} = \frac{U_{e1}}{R_1} + \frac{U_{e2}}{R_2}.$$

$$U_a = -\left(\frac{R}{R_1} U_{e1} + \frac{R}{R_2} U_{e2}\right). \quad (1.82)$$

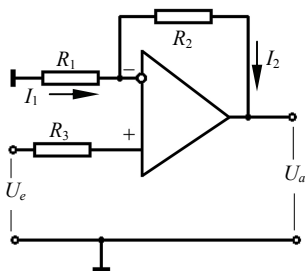


Рис. 1.21. Эквивалентная схема неинвертирующего операционного усилителя

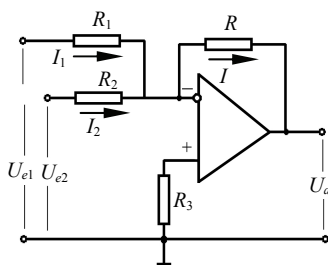


Рис. 1.22. Эквивалентная схема сумматора

Если сопротивления выбрать таким образом, что $R_1 = R_2 = R$, то

$$U_a = -(U_{e1} + U_{e2}). \quad (1.83)$$

В интеграторе (рис. 1.23) в цепь отрицательной обратной связи инвертирующего усилителя вместо резистора R_2 включен конденсатор с электроемкостью C . Поскольку $I_1 = I_2$, то

$$I_1 = -\frac{U_e}{R_1}; \quad I_2 = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(CU_a) = C \frac{dU_a}{dt};$$

$$U_a = -\frac{1}{R_1 C} \int U_e dt. \quad (1.84)$$

На рис. 1.24 представлена эквивалентная схема дифференциатора. Она получается из схемы интегратора путем перемены местами резистора R_1 и конденсатора C . Сила тока в цепи резистора R_1 : $I_2 = -U_a / R_1$, а в цепи конденсатора: $I_1 = dq/dt = C dU_e/dt$. Поскольку $I_1 = I_2$, то $-U_a / R_1 = C dU_e/dt$ и

$$U_a = -R_1 C \frac{dU_e}{dt}. \quad (1.85)$$

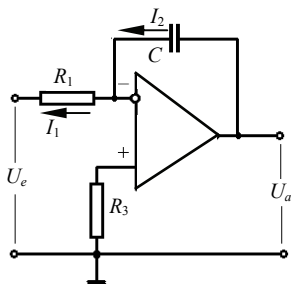


Рис. 1.23. Эквивалентная схема интегратора

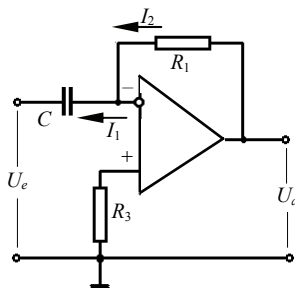


Рис. 1.24. Эквивалентная схема дифференциатора

В большинстве случаев электронные схемы предназначены для обработки сигналов в виде напряжения. Однако иногда приходится иметь дело с сигналом в виде тока, снимаемого, например, с выхода фотоумножителя или фотодиода. На рис. 1.25 показан преобразователь тока в напряжение на основе операционного усилителя. Здесь выполняются соотношения:

$$I_e = I_2;$$

$$U_a = -I_2 R_2 = -I_e R_2. \quad (1.86)$$

На рис. 1.26 представлена схема измерительного усилителя тока, который используется для измерения малых токов без внесения искажений в цепь, имеющих место при измерении токов микроамперметром за счет его внутреннего сопротивления.

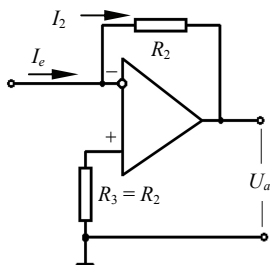


Рис. 1.25. Эквивалентная схема преобразователя тока в напряжение

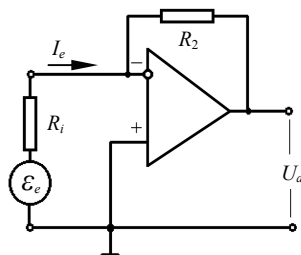


Рис. 1.26. Эквивалентная схема измерительного усилителя тока

Источник измеряемого тока показан в виде эквивалентной схемы, содержащей ЭДС \mathcal{E}_e с внутренним сопротивлением R_i . Эта схема играет роль резистора R_1 в обычной схеме инвертирующего усилителя. В этом случае $U_a = -I_e R_2$. Входное сопротивление этой схемы очень мало и не влияет на значение силы измеряемого тока. Заменяв в схеме резистор R_2 на конденсатор, получим интегратор входного тока (усилитель электрического заряда), удобный, например, для усиления сигналов пьезоэлектрических датчиков.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Приведите определение усилителя электрических сигналов и структурную схему процесса усиления. Перечислите основные характеристики усилителей и уясните их смысл.
2. Поясните принцип действия усилителя электрических сигналов на основе вакуумного триода.
3. Объясните устройство и принцип действия биполярного транзистора.
4. Уясните принцип действия усилителя электрических сигналов на основе транзистора.
5. Поясните принцип действия усилителя электрических сигналов с отрицательной обратной связью. Какова роль цепи отрицательной обратной связи усилителя? Запишите формулу для определения передаточной функции усилителя с отрицательной обратной связью; поясните смысл входящих в нее величин.
6. Приведите определение и эквивалентную схему операционного усилителя. Поясните смысл основных элементов схемы.
7. Начертите эквивалентные схемы и объясните принцип действия инвертирующего и неинвертирующего операционных усилителей.
8. Приведите эквивалентные схемы и поясните принцип действия сумматора, интегратора, дифференциатора, преобразователя тока в напряжение и измерительного усилителя тока на основе операционных усилителей.

Часть 2. ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА ВЕЩЕСТВ

С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЙ

Состав вещества является физической величиной, характеризующей свойство этого вещества, которое оценивается количественно.

Различают элементный, фазовый (структурно-фазовый) и химический состав веществ, качественный и количественный анализ состава веществ. Методы анализа состава веществ можно подразделить на физические, химические и физико-химические.

Состав многокомпонентных веществ определяют путем измерения содержания отдельных компонентов на основе различия их разнообразных свойств. Определение состава вещества и концентрации компонентов осуществляется аналитическими измерениями, которые представляют собой одну из наиболее важных областей применения измерительной техники.

Для измерения концентрации компонентов вещества в его составе используются различные единицы: процентная и молярная концентрации растворов; массовые и объемные проценты; атомные проценты; *ppm* – миллионная ($1 \cdot 10^{-6}$) и *ppb* – биллионная (миллиардная) ($1 \cdot 10^{-9}$) доли.

В числе разнообразных методов измерения состава веществ особую группу составляют современные аналитические методы, основанные на измерениях с применением излучений.

Излучение обычно рассматривается как процесс испускания электромагнитных волн ускоренно движущимися заряженными частицами (или переменными токами) или фотонов при изменении состояния квантовой системы. Термин «излучение» используется также для обозначения самого излученного электромагнитного поля, или потока фотонов. В этих определениях речь идет, прежде всего, об электромагнитном излучении. Однако в последнее время наряду с электромагнитным излучением, под которым понимают распространяющееся в пространстве электромагнитное поле (электромагнитные волны), или потоки квантов электромагнитной энергии – фотонов, рассматривают другие виды излучений – акустическое и корпускулярное.

Итак, к видам излучений, применяемых в процессах измерений, относятся акустическое, электромагнитное и корпускулярное излучения.

Акустическое излучение – упругие акустические волны (колебательное движение частиц упругой среды – твердой, жидкой или газообразной, распространяющееся в среде).

Корпускулярное излучение – потоки частиц молекулярного, атомного и субатомного масштаба (молекул, атомов, ионов, ядер, нейтронов, электронов). Корпускулярное излучение (поток частиц) также проявляет волновые свойства; оно характеризуется длиной волны де Бройля $\lambda = h / p$, где h – постоянная Планка; p – импульс частицы.

В основе методов анализа лежат фундаментальные процессы взаимодействия акустического и электромагнитного излучений, а также ускоренных частиц (корпускулярных излучений) с веществом. Соответствующие аналитические методы основаны на определении характеристик частиц и излучений, испускаемых веществом под воздействием направляемого на него анализирующего излучения либо претерпевших взаимодействие с веществом.

Измерение состава вещества с применением излучений можно охарактеризовать функциональной схемой, приведенной на рис 2.1.

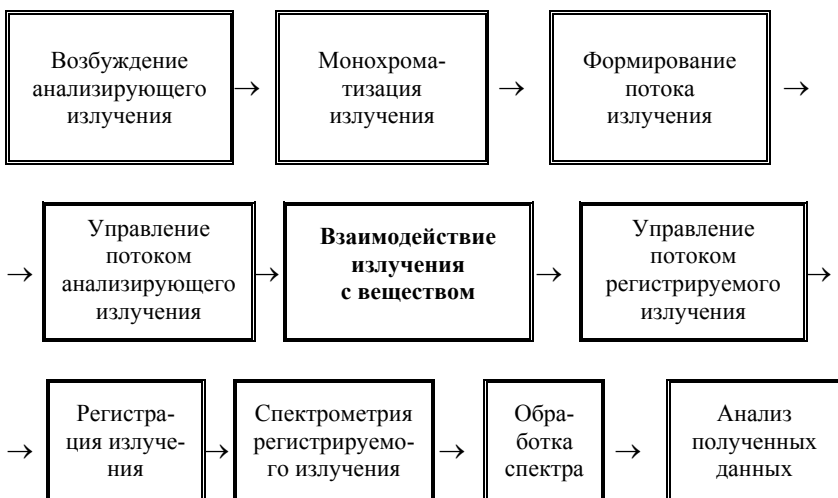


Рис. 2.1. Функциональная схема измерения состава вещества с применением излучений

Для реализации процесса измерений необходимо получить первичное анализирующее излучение, сформировать поток излучения определенной энергии, направить его на анализируемое вещество. Для обеспечения моноэнергетичности (монохроматичности) анализирующего аку-

стического, корпускулярного либо электромагнитного излучения используются монохроматоры.

После взаимодействия анализирующего излучения с исследуемым образцом испускается излучение, содержащее информацию о составе и свойствах вещества. Это излучение регистрируется с применением детекторов. Для анализа распределения регистрируемых излучений по энергиям или другим параметрам (массам, импульсам, частотам, длинам волн) используются спектрометры. Обычно анализируются перечисленные характеристики и интенсивности излучений, испускаемых исследуемым веществом либо претерпевших взаимодействие с ним. По характеристикам регистрируемого излучения идентифицируется природа атомов исследуемого образца, а по интенсивности определяется концентрация атомов. Эти сведения в совокупности и определяют состав анализируемого вещества.

Разработанные методы анализа представлены практически любой возможной комбинацией анализирующих излучений, направляемых из источника на образец исследуемого вещества и регистрируемых детектором излучений. В ряде методов после взаимодействия с веществом регистрируются и анализируются те же излучения, которые направляются на образец в качестве анализирующих. В основе каждого конкретного аналитического метода лежит определенный процесс взаимодействия анализирующего излучения с веществом.

Во второй главе рассматриваются физические основы измерений состава веществ с применением излучений в соответствии с функциональной схемой, приведенной на рис. 2.1, в такой последовательности:

- физическая природа, основные свойства и характеристики каждого из видов излучений;
- принципы возбуждения и монохроматизации излучений;
- принципы формирования потоков излучений и управления ими;
- принципы регистрации и спектрометрии излучений;
- физические и физико-химические процессы взаимодействия излучений с веществом, лежащие в основе определенного аналитического метода;
- принципы обработки и анализа получаемой информации.

Причем наряду с физическими принципами преобразований каждого из видов излучений рассматриваются принципы действия соответствующего оборудования: источников излучений, монохроматоров, проводящих систем, детекторов, усилителей сигналов, спектрометров, а при рассмотрении конкретных аналитических методов – соответствующих приборов.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. В чем состоит сущность измерения состава вещества? Приведите классификацию состава веществ и методов анализа состава.
2. Поясните смысл понятия «излучение».
3. Перечислите виды излучений, применяемых при измерении состава веществ. Дайте определение каждого из видов излучений.
4. Приведите функциональную схему измерения состава вещества с применением излучений.

2.1. Измерения с применением электромагнитного и корпускулярного излучений

Значительная часть методов измерений свойств веществ реализуется с применением электромагнитного и корпускулярного излучений. При этом часто эти излучения используются совместно. В качестве анализирующего излучения, направляемого на вещество, может использоваться электромагнитное излучение, а в качестве регистрируемого – корпускулярное, и наоборот. Естественно, что имеются и методы измерений с применением только электромагнитного или только корпускулярного излучений.

Поскольку корпускулярное излучение представляет собой поток частиц, то для реализации измерений с применением данного излучения, для обеспечения движения частиц и управления ими необходимы вакуумные условия.

Вакуум – в экспериментальных условиях это состояние газа при давлении меньше атмосферного. Различают несколько степеней вакуума. В основу условного разделения областей вакуума на следующие диапазоны: низкий, средний и высокий – положено число Кнудсена Kn , определяющее соотношение между числом молекул газа, взаимодействующих друг с другом $\langle z \rangle$, и числом молекул $\langle z_s \rangle$, взаимодействующих со стенками вакуумной камеры:

$$Kn = \frac{\langle z_s \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{\langle l \rangle}{L_{эф}}, \quad (2.1)$$

где $\langle z_s \rangle$ – число столкновений молекул газа со стенками вакуумной камеры в единицу времени; $\langle z \rangle$ – среднее число столкновений молекул газа с другими молекулами в единицу времени; $\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул; $L_{эф}$ – эффективный линейный размер вакуумной камеры ($L_{эф} = 4V/A$, где V – объем камеры; A – площадь поверхности ее стенок).

Низкий вакуум характеризуется разрежением газа, при котором преобладают взаимные столкновения молекул, число Кнудсена $\text{Kn} \ll 1$ и средняя длина свободного пробега молекул $\langle l \rangle \ll L_{\text{эф}}$. Из условия изменения режима течения газа принимают для области низкого вакуума $\text{Kn} < 5 \cdot 10^{-3}$. Обычно низкому вакууму соответствует область давлений от 10^5 до 100 Па ($\sim 760\text{--}1 \text{ мм рт. ст.}$).

Средний вакуум характеризуется разрежением газа, при котором средняя длина свободного пробега молекул $\langle l \rangle$ соизмерима с эффективным линейным размером вакуумной камеры: $\langle l \rangle \approx L_{\text{эф}}$; $\langle z_s \rangle \approx \langle z \rangle$; $\text{Kn} \approx 1$. Среднему вакууму обычно соответствует область давлений от 100 до $0,1 \text{ Па}$ ($\sim 1\text{--}10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$), число Кнудсена принимает значение из интервала $5 \cdot 10^{-3} < \text{Kn} < 1,5$.

Высокий вакуум характеризуется разрежением газа, при котором $\langle l \rangle \gg L_{\text{эф}}$, $\langle z_s \rangle \gg \langle z \rangle$. При этом столкновения молекул газа со стенками преобладают над взаимными столкновениями молекул, $\text{Kn} > 1$. Из условия изменения режима течения газа для области высокого вакуума принимают $\text{Kn} > 1,5$. Высокому вакууму обычно соответствует область давлений от 10^{-1} до 10^{-5} Па ($10^{-3}\text{--}10^{-7} \text{ мм рт. ст.}$).

Сверхвысокий вакуум характеризуется разрежением газа, при котором не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа, за время, существенное для рабочего процесса (например, для анализа состава поверхности). Сверхвысокому вакууму обычно соответствует область давлений $p < 10^{-5} \text{ Па}$.

В таблице приведены значения концентрации молекул n , средней длины свободного пробега молекул $\langle l \rangle$, частоты соударений молекул о стенку ν' для азота при $T = 273 \text{ К}$ и различных давлениях, а также времени τ образования мономолекулярного слоя газа на поверхности твердого тела, дающие представление о значениях этих параметров в различных областях вакуума.

Значения параметров состояния газа (N_2) при различных давлениях

Параметр	10^5 Па	10^{-4} Па	10^{-6} Па	10^{-8} Па	10^{-10} Па
$n, \text{ м}^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{25}$	$2,7 \cdot 10^{16}$	$2,7 \cdot 10^{14}$	$2,7 \cdot 10^{12}$	$2,7 \cdot 10^{10}$
$\langle l \rangle, \text{ м}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^1$	$6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^7$
$\nu', \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{27}$	$2,8 \cdot 10^{18}$	$2,8 \cdot 10^{16}$	$2,8 \cdot 10^{14}$	$2,8 \cdot 10^{12}$
τ	$3 \cdot 10^{-9} \text{ с}$	3 с	5 мин	$8,5 \text{ ч}$	35 сут

Измерение состава веществ с применением корпускулярного излучения чаще всего осуществляется в условиях, соответствующих области высокого вакуума. В этом случае частицы и их потоки перемещаются

практически без взаимодействия с молекулами газа. При необходимости анализа чистой (свободной от адсорбированных молекул) поверхности вещества измерения проводятся в условиях сверхвысокого вакуума. В условиях, соответствующих области среднего вакуума, наиболее эффективно осуществляется ионизация молекул в газовом разряде, что используется для получения ионов в ионных источниках.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Какие из известных Вам методов измерения состава веществ реализуются с применением: электромагнитного и корпускулярного излучений; только электромагнитного излучения; только корпускулярного излучения?
2. По каким причинам измерение состава вещества с применением корпускулярного излучения требует вакуумных условий?
3. Какой критерий положен в основу условного разделения состояния разреженного газа на степени вакуума?
4. Перечислите и кратко охарактеризуйте степени вакуума.

2.2. Принципы преобразований электромагнитного излучения

2.2.1. Природа и основные характеристики электромагнитного излучения

Электромагнитное излучение, применяемое в измерениях, – распространяющиеся в пространстве электромагнитные колебания (взаимосвязанные переменные электрическое и магнитное поля (электромагнитная волна)) или поток квантов электромагнитной энергии – фотонов.

Электромагнитная волна является поперечной волной, в которой векторы напряженности электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{H} полей колеблются (периодически изменяются) в пространстве во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 2.2). Эти векторы составляют с вектором Пойнтинга $\mathbf{\Pi} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}]$, определяющим направление распространения энергии монохроматической электромагнитной волны, правую тройку векторов.

Уравнение плоской электромагнитной волны, распространяющейся в направлении x , записанное для модуля вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} (в оптике – светового вектора), имеет вид

$$E = E_m \sin 2\pi \left(vt - \frac{x}{\lambda} \right), \quad (2.2)$$

где E_m – амплитудное значение напряженности; ν – частота распространяющихся электромагнитных колебаний; t – время; x – координата вдоль направления распространения волны.

Основными характеристиками электромагнитной волны являются: частота ν и длина волны $\lambda = v / \nu$, где v – фазовая скорость распространения волны. Используются также циклическая частота $\omega = 2\pi\nu$ и волновое число $k = 2\pi / \lambda = \omega / v$. Волна, в которой распространяющиеся колебания имеют определенную строго заданную частоту и неизменную амплитуду, является монохроматической. Энергия монохроматической волны переносится в пространстве со скоростью, равной фазовой скорости v . Значение фазовой скорости зависит от среды, в которой распространяется волна. В свободном пространстве (в вакууме) фазовая скорость электромагнитной волны (скорость света)

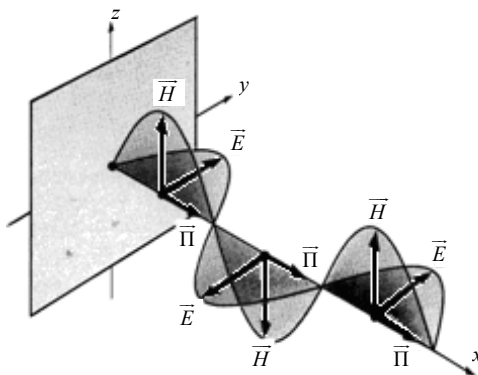


Рис. 2.2. Схематическое изображение плоской электромагнитной волны

$$c = 299\,792\,458 \pm 1,2 \text{ м/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Скорость света в среде зависит от показателя преломления среды n , различного для различных частот электромагнитного излучения. Зависимость показателя преломления среды от частоты называют дисперсией среды, а фазовой скорости от частоты – дисперсией света. Если электромагнитная волна не является монохроматической, то энергия волны переносится в среде с групповой скоростью, отличной от фазовой. В вакууме фазовая и групповая скорости света равны.

Во многих процессах электромагнитное излучение проявляет корпускулярные свойства. При учете корпускулярной природы электромагнитное излучение рассматривается как поток квантов электромагнитной энергии $\varepsilon_{ph} = h\nu$, где $h = 6,626\,176\,(36) \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка (квант действия). Квант электромагнитного излучения рассматривается как элементарная частица – фотон, – обладающая энергией $\varepsilon_{ph} = h\nu$, импульсом $p_{ph} = h\nu / c$ и рядом других квантовых характеристик. Скорость света в вакууме c и постоянная Планка h являются фундаментальными физическими константами.

На рис. 2.3 приведена в удобном для рассмотрения виде шкала электромагнитного излучения, представленная в порядке изменения длины волны λ и частоты ν излучения ($\nu = c / \lambda$).

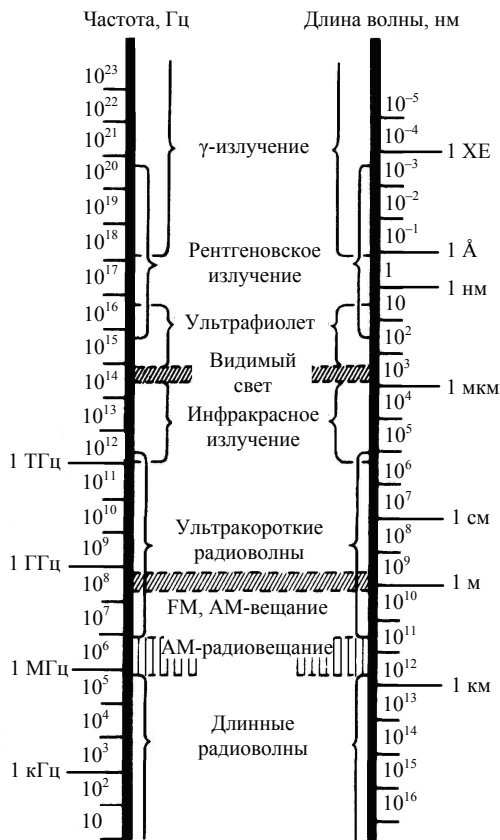


Рис. 2.3. Шкала электромагнитного излучения

Электромагнитные волны с частотами $\nu = 3 \cdot 10^{-3}$ – $3 \cdot 10^4$ Гц и длинами $\lambda = 10^{11}$ – 10^4 м, возбуждаемые переменными электрическими токами в различных устройствах, относящиеся к низкочастотным (сверхдлинным), на рисунке не отображены.

Затем в порядке возрастания следует диапазон радиоволн с широким интервалом частот: $\nu = 3 \cdot 10^4$ – $3 \cdot 10^{12}$ Гц и длин волн: $\lambda = 10^4$ – 10^{-4} м. Радиоволны возбуждаются за счет электромагнитных колебаний в вибраторах (электрических колебательных контурах) специаль-

ных радиопередающих устройств. Они могут генерироваться, излучаться и приниматься радиоаппаратурой. Радиоволны, в свою очередь, подразделяют на длинные ($\nu = 3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ Гц), средние ($\nu = 3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$ Гц), короткие ($\nu = 3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$ Гц) (радиовещание амплитудно-модулированными (АМ) сигналами), ультракороткие ($\nu = 3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^{11}$ Гц) и субмиллиметровые ($\nu = 3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{12}$ Гц). Ультракороткие радиоволны, в свою очередь, подразделяют на метровые ($\lambda = 10 - 1$ м) и дециметровые ($\lambda = 10 - 1$ дм) (радиовещание передач частотно-модулированных (FM) сигналов и телевизионное вещание), сантиметровые ($\lambda = 10 - 1$ см) (радиолокация) и миллиметровые ($\lambda = 10 - 1$ мм).

Далее следует оптический диапазон электромагнитного излучения. К оптическому диапазону относят инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения, испускание которых обусловлено переходами оптических электронов атомов, расположенных на внешних электронных оболочках.

Природа электромагнитного излучения в видимой области спектра, а также ультрафиолетового и рентгеновского излучений – электронные переходы в атомах. Характеристическое рентгеновское излучение испускается при переходе электронов из более возбужденных состояний на внутренние электронные оболочки атомов.

Инфракрасное (ИК) излучение характеризуется частотами $\nu = 3 \cdot 10^{12} - 3,95 \cdot 10^{14}$ Гц и длинами волн $\lambda = 10^{-4} - 0,74 \cdot 10^{-6}$ м. Оно испускается веществом за счет колебательного движения молекул и электронных переходов в атомах. ИК излучение подразделяется на следующие диапазоны: далекое ($\lambda = 50 - 2000$ мкм), среднее ($\lambda = 2,5 - 50$ мкм) и ближнее ($\lambda = 0,74 - 2,5$ мкм).

Более высоким частотам соответствует очень узкий и очень важный диапазон оптического излучения – видимый свет. Электромагнитные волны, соответствующие видимому свету, имеют длины $\lambda = 0,38 - 0,74$ мкм = $380 - 740$ нм = $(3,8 - 7,4) \cdot 10^{-7}$ м.

Ультрафиолетовое (УФ) электромагнитное излучение имеет длины волн $\lambda = 380 - 10$ нм и подразделяется на ближнее ($\lambda = 380 - 200$ нм) и крайнее (вакуумный ультрафиолет, $\lambda = 200 - 10$ нм).

Рентгеновское излучение характеризуется длинами волн $\lambda = 10^2 - 10^{-3}$ нм и энергиями фотонов $\epsilon = h\nu = 100$ эВ – 1 МэВ. Его подразделяют на мягкое ($\lambda > 0,2$ нм) и жесткое ($\lambda < 0,2$ нм).

Радиоактивное γ -излучение может сопровождать процессы α - и β -распада атомных ядер, а также испускаться при ядерных реакциях. Ему соответствуют следующие значения частот и длин волн: $\nu > 3 \cdot 10^{18}$ Гц, $\lambda < 0,1$ нм. При переходах ядер атомов из более возбужденных состояний в менее возбужденные испускается γ -излучение.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Охарактеризуйте природу электромагнитного излучения.
2. Перечислите основные характеристики электромагнитного излучения.
3. Приведите шкалу электромагнитного излучения. Охарактеризуйте особенности электромагнитного излучения каждого из диапазонов шкалы.
4. Объясните причины перекрывания соседних диапазонов шкалы электромагнитного излучения (рис. 2.3): ультракоротких радиоволн и инфракрасного излучения; ультрафиолетового и рентгеновского излучений; рентгеновского диапазона и γ -излучения.

2.2.2. Получение и формирование потоков электромагнитного излучения**2.2.2.1. Сверхвысокочастотное электромагнитное излучение.**

В измерительной технике, связи, радиолокации, а также в некоторых технологических процессах используется электромагнитное сверхвысоко-частотное (СВЧ) излучение, интервал частот которого $\nu = 300 \text{ МГц} - 300 \text{ ГГц}$ (интервал длин волн $\lambda = 1 \text{ м} - 1 \text{ мм}$). Это излучение, называемое также микроволновым, включает в себя дециметровый, сантиметровый и миллиметровый диапазоны радиоволн.

Микроволновое излучение большой интенсивности используется для бесконтактного нагрева тел (как в бытовых микроволновых печах, так и в промышленных печах для термообработки металлов), для ионизации молекул газов в ионных источниках, а также для радиолокации. Излучение малой интенсивности используется в средствах связи: портативных радио- и сотовых телефонах, устройствах Bluetooth, WiFi и др.

В соответствующий СВЧ излучению диапазон частот входят частоты колебаний молекул веществ, а также частоты переходов электронов в атомах между энергетическими подуровнями. В этой связи СВЧ излучение используется в качестве анализирующего в аналитических методах, объединенных названием микроволновая спектроскопия или радиоспектроскопия (см. подразд. 2.4.4).

Источники сверхвысокочастотного излучения. Источниками СВЧ излучения являются генераторные лампы (ламповые генераторы) и генераторы магнетронного типа, а также полупроводниковые генераторы на основе диодов Ганна, лавинно-пролетных и туннельных диодов.

Генераторные лампы – электровакуумные электронные приборы, предназначенные для преобразования энергии источника постоянного или переменного тока в энергию высокочастотных электромагнитных колебаний.

Рассмотрим принцип действия простейшего лампового генератора электромагнитных колебаний низких частот, состоящего из вакуумного триода и колебательного LC контура (рис. 2.4).

При включении источника анодного напряжения в колебательном контуре возникают собственные электромагнитные колебания. Чтобы колебания в контуре не затухали из-за потерь энергии, ее необходимо пополнять. Это осуществляется с помощью триода: переменное напряжение, поступающее от контура к сетке триода через трансформаторную связь, вызывает изменение анодного тока; в результате в цепи анода появляются пульсации тока, которые при правильном подборе фазы напряжения, подаваемого на сетку лампы (цепь обратной связи), будут пополнять энергию колебательного контура (положительная обратная связь). Для того чтобы колебания стали незатухающими, т. е. для самовозбуждения, необходимо катушку L цепи обратной связи включить так, чтобы переменные напряжения на аноде и на сетке были сдвинуты по фазе на π . При этом пополнение энергии колебательного контура будет превосходить потери ее за то же время, и амплитуда начальных колебаний, возникших в контуре, будет расти. Однако по мере нарастания амплитуды колебаний коэффициент усиления уменьшается за счет нелинейности вольтамперной характеристики триода. В результате устанавливается стационарная амплитуда генерируемых колебаний. Частота ν электромагнитных колебаний определяется при этом параметрами колебательного контура – электроемкостью C и индуктивностью L . Так, частота генерируемых колебаний будет равна резонансной частоте колебательного контура:

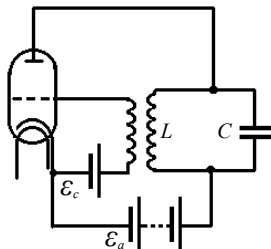


Рис. 2.4. Схема простейшего лампового генератора электромагнитных колебаний

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.3)$$

В области частот, соответствующих СВЧ излучению, существенными становятся емкости и индуктивности деталей не только электронной схемы генератора, но и самого вакуумного триода. Поэтому в генераторных лампах СВЧ диапазона внешний колебательный контур отсутствует, а роль элементов колебательного контура выполняют межэлектродные емкости и индуктивности самих электродов вакуумного триода, т. е. ламповый генератор является прибором с распределенными параметрами электрической цепи.

Наиболее распространенными генераторными лампами являются металлокерамические триоды. На рис. 2.5 представлена конструкция металлокерамического генераторного триода средней мощности. Его основными рабочими элементами являются нагреваемый катод 7, эмиттирующий электроны, анод 5 и сетка 6.

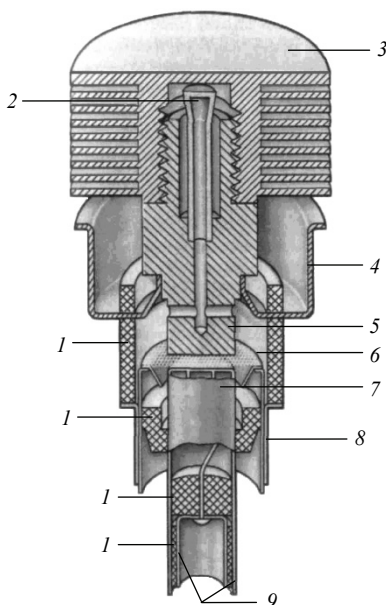


Рис. 2.5. Конструкция металлокерамического генераторного триода – источника СВЧ излучения:

- 1 – керамические изоляторы;
- 2 – штенгель для высоковакуумной откачки;
- 3 – радиатор;
- 4 – электрический вывод анода;
- 5 – анод;
- 6 – сетка;
- 7 – катод;
- 8 – электрический вывод сетки;
- 9 – электрические выводы катода и нагревателя

Эти электроды расположены на определенных достаточно близких расстояниях друг от друга; их поверхности параллельны. Межэлектродные емкости и индуктивности электродов (совместно с их цилиндрическими выводами) играют роль элементов колебательного контура, в котором возбуждаются электромагнитные колебания соответствующей частоты. Электроды разделены керамическими изоляторами 1, которые плотно соединены с металлическими электродами. При изготовлении триода осуществляется высоковакуумная откачка его рабочего объема через штенгель 2, верхний конец которого после отсоединения от откачивающей вакуумной системы герметизируется. Для воздушного охлаждения работающего триода применяется металлический радиатор 3. Цилиндрические выводы 4 и 9 электродов предназначены для подачи на электроды соответствующих напряжений и приспособлены к непосредственному подключению генератора к резонаторной колебательной системе, например к объемному резонатору.

Генераторные лампы различают по числу электродов (триоды, тетроды, пентоды), роду работы (непрерывного действия и импульсные), уровню мощности (малой мощности – до 25 Вт, средней мощности – до 1 кВт, мощные – до 200 кВт, сверхмощные – свыше 200 кВт), диапазону рабочих частот (коротковолновые (КВ) – до 30 МГц, ультракоротковолновые (УКВ) – до 300 МГц, сверхвысокочастотные (СВЧ) – свыше 300 МГц).

С целью увеличения мощности генерируемых электромагнитных колебаний используются нагреваемые катоды с большой – в десятки квадратных сантиметров – эмиттирующей поверхностью.

Для генерирования электромагнитных колебаний более высоких частот СВЧ диапазона используются магнетронные генераторы. В общем случае, магнетрон – прибор, принцип действия которого основан на движении заряженных частиц, в частности электронов, во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях.

Принцип действия магнетронных генераторов СВЧ излучения основан на взаимодействии электронов, движущихся в электрическом и магнитном полях по криволинейным траекториям, с возбуждаемым электромагнитным полем. В магнетронном генераторе энергия поступает от источника анодного напряжения, колебательной системой являются объемные резонаторы, а функции активного элемента выполняет поток электронов.

На рис. 2.6 и 2.7 приведены схематические изображения магнетронного генератора, электродная система которого представляет собой вакуумный диод.

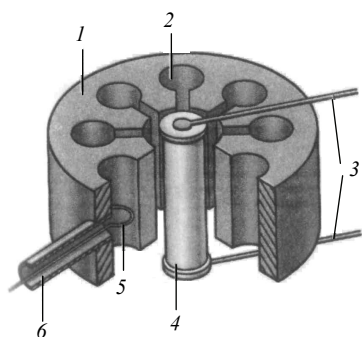


Рис. 2.6. Схема многорезонаторного магнетронного генератора СВЧ излучения:

1 – анод; 2 – резонатор; 3 – выводы нагревателя катода; 4 – катод; 5 – петля связи для вывода СВЧ энергии; 6 – устройство вывода СВЧ энергии

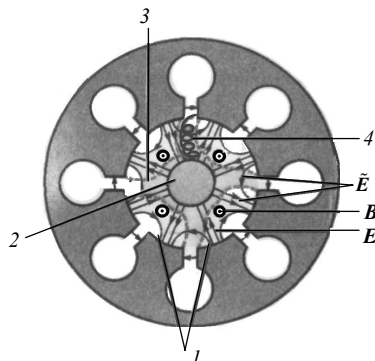


Рис. 2.7. Схема принципа действия магнетронного генератора СВЧ излучения:

1 – анод; 2 – катод; 3 – сгусток электронов; 4 – траектория электронов; силовые линии: E – постоянного электрического поля; B – постоянного магнитного поля; \tilde{E} – СВЧ электрического поля

Анод 1 магнетронного генератора (рис. 2.6) представляет собой массивный полый цилиндр, изготовленный чаще всего из меди, во внутренней части которого вырезаны объемные резонаторы 2 со щелями, выходящими на внутреннюю поверхность цилиндра. Вдоль оси цилиндра расположен

также цилиндрический накаляемый катод 4. Для вывода СВЧ энергии используется проволочная петля 5, закрепленная в одном из резонаторов.

Электроны эмиттируют из нагреваемого катода и ускоряются анодным напряжением. Постоянные электрическое и магнитное поля создаются в пространстве взаимодействия внешними источниками: электрическое с напряженностью E – напряжением между катодом и анодом (анодным напряжением); магнитное с индукцией B – током, пропускаемым по обмотке внешней катушки либо внешними постоянными магнитами. Под действием магнитного поля, силовые линии которого направлены параллельно оси цилиндрического анода, траектории электронов искривляются (рис. 2.7). Под действием сил со стороны электрического ($F_e = eE$) и магнитного ($F_m = e[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$) полей электроны движутся по сложным траекториям с определенной средней скоростью.

При достаточно высоком значении индукции магнитного поля электрон, движущийся по криволинейной траектории, не может достичь анода, происходит так называемое магнитное запираание диода. В режиме магнитного запираания некоторая часть электронов движется по циклоидным траекториям. Под действием собственного поля электронов, а также случайных статистических эффектов в электронном облаке возникают неустойчивости, которые приводят к генерации электромагнитных колебаний, эти колебания усиливаются объемными резонаторами.

Объемный резонатор обеспечивает необходимую для генерирования излучения положительную обратную связь и представляет собой замкнутую с боковыми и торцевыми стенками, например цилиндрическую, полость с хорошо проводящими боковыми стенками, внутри которой могут осуществляться свободные электромагнитные колебания. В аноде магнетронного генератора содержится несколько объемных резонаторов (см. рис. 2.6 и 2.7). Торцевые электроды расположены по обе стороны анодного блока перпендикулярно его оси.

Рассмотрим принцип действия объемного резонатора. Пусть имеется плоский конденсатор, обкладки которого выполнены в виде дисков (рис. 2.8). Между дисковыми обкладками конденсатора, включенного в цепь переменного тока, создается однородное по сечению переменное электрическое поле (ток смещения), которое, в свою очередь, порождает переменное магнитное поле. Связь между электрическим и магнитным полями определяется уравнением Максвелла

$$\text{rot } \tilde{\mathbf{B}} = \mu\epsilon_0 \left(\mathbf{j} + \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial \tilde{\mathbf{E}}}{\partial t} \right), \quad (2.4)$$

которое в отсутствие токов проводимости ($\mathbf{j} = 0$) имеет вид

$$\operatorname{rot} \tilde{\mathbf{B}} = \mu\mu_0 \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \tilde{\mathbf{E}}}{\partial t}. \quad (2.5)$$

Из уравнения (2.5) следует, что изменяющееся во времени электрическое поле порождает вихревое магнитное поле. Силовые линии магнитного поля представляют собой окружности, центры которых расположены на оси конденсатора. С увеличением частоты изменения напряженности $\tilde{\mathbf{E}}$ электрического поля увеличивается индукция $\tilde{\mathbf{B}}$ возбуждаемого переменного магнитного поля. Магнитное поле, в свою очередь, вызывает появление дополнительного электрического поля в соответствии с уравнением Максвелла:

$$\operatorname{rot} \tilde{\mathbf{E}} = -\frac{d\tilde{\mathbf{B}}}{dt}. \quad (2.6)$$

Возбужденное электрическое поле, согласно правилу Ленца, стремится уменьшить первоначальное электрическое поле, а также возбуждает дополнительное магнитное поле. Таким образом, при высоких частотах плоский конденсатор объединяет в себе два элемента – емкость и индуктивность. При достаточно высокой частоте поочередное возбуждение магнитным полем электрического и электрическим – магнитного может проходить неоднократно. В результате нарушается однородность электрического поля между обкладками плоского конденсатора. Направление напряженности электрического поля может несколько раз изменяться при переходе от оси конденсатора к его краю. При этом на определенных расстояниях от оси, соответствующих точкам изменения направления вектора $\tilde{\mathbf{E}}$, напряженность поля равна нулю.

Если между обкладками конденсатора поместить проводящий полый цилиндр, внутренний радиус которого r_0 соответствует нулю напряженности $\tilde{\mathbf{E}}$, то сила тока по стенкам такого цилиндра будет близкой к нулю. Внутри цилиндра могут существовать взаимосвязанные переменные электрическое и магнитное поля. Такой цилиндр настроен на определенную резонансную частоту, зависящую от размеров цилиндра, и является объемным резонатором. В идеальном резонаторе сами по себе поля

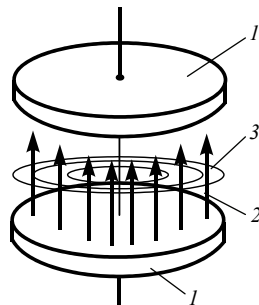


Рис. 2.8. Схема принципа действия объемного резонатора:
1 – торцевые электроды – обкладки конденсатора; 2 – силовые линии электрического поля; 3 – силовые линии магнитного поля

существовали бы бесконечно долго. Чтобы в реальном резонаторе поля не затухали, через боковое отверстие резонансной полости вводят электромагнитную энергию резонансной частоты. В результате формируются электромагнитные колебания с очень узкой полосой пропускания и высокой добротностью, достигающей $\sim 10^5$ и выше.

За счет электромагнитных колебаний, возбуждаемых в резонаторах магнетронного генератора, вблизи щелей анода возникает сверхвысоко-частотное электрическое поле (см. рис. 2.6 и 2.7). На электроны, испускаемые катодом и движущиеся в пространстве взаимодействия от катода к аноду, действуют три поля: постоянное электрическое поле, постоянное магнитное поле и электрическое СВЧ поле резонаторной системы. Под действием постоянного электрического поля электроны приобретают скорость в радиальном направлении; при этом энергия источника анодного напряжения преобразуется в кинетическую энергию электронов. Под действием магнитного поля электроны приобретают тангенциальную составляющую скорости. СВЧ поле, проникающее через щели резонаторов в промежуток между катодом и анодом, либо тормозит электроны (если тангенциальные составляющие скорости электронов и напряженности СВЧ поля совпадают по направлению), либо дополнительно ускоряет их (в противоположном случае). Если электрон ускоряется переменным полем электромагнитной волны, то радиус его траектории уменьшается, и он отклоняется в направлении катода. При этом энергия передается от волны к электрону. Если же электрон тормозится полем волны, то его энергия передается волне, при этом радиус траектории электрона увеличивается, и он получает возможность достичь анода. Поскольку постоянное электрическое поле, приложенное между анодом и катодом, совершает положительную работу только в том случае, когда электрон достигает анода, то энергия передается в основном от электронов к электромагнитной волне.

Под действием СВЧ поля и взаимно перпендикулярных (скрещенных) статических электрического и магнитного полей электроны скапливаются вблизи щелей и образуют сгустки (спицы). При взаимодействии с СВЧ полем электроны в сгустках отдают полую кинетическую энергию и под действием постоянного электрического поля приближаются к аноду. Они достигают анода, отдав электромагнитному полю почти всю энергию, что обуславливает высокий (до 90%) КПД. Этим процессом обеспечивается возможность приборов магнетронного типа усиливать и генерировать СВЧ колебания.

Основным условием, при котором электрическое СВЧ поле группирует электроны в сгустки пространственного заряда и тормозит большую часть электронов, отбирая у них энергию, полученную от постоян-

ного электрического поля, является условие синхронизма электронов и волн. Для непрерывного торможения необходимо, чтобы электроны перемещались от одного резонатора к другому (соседнему) за время, равное полупериоду СВЧ колебаний, или чтобы составляющая средней скорости, характеризующая движение электронов, была равна фазовой скорости СВЧ волны. Если средняя скорость вращения электрона вокруг катода совпадает с фазовой скоростью волны, электрон может непрерывно находиться в тормозящей области, и многократное, в течение ряда периодов, взаимодействие электронов с высокочастотным полем приводит к наиболее эффективной передаче энергии от электрона к волне.

Для достижения условия синхронизма электронов и волн осуществляют замедление электромагнитных волн с помощью замедляющих систем. Замедляющая система – устройство, позволяющее уменьшить фазовую скорость электромагнитной волны. Замедление электромагнитной волны осуществляют различными способами: удлиняют путь волны, направляя ее не по оси системы, а, например, по винтовой линии; создают полости, в которых передвижение волны вперед происходит после ряда отражений, и т. д. По конструкции различают спиральные, резонансные и штыревые замедляющие системы. Спиральные замедляющие системы представляют собой навитые из круглой или ленточной проволоки спирали с постоянным шагом и радиусом и помещенные в металлическую оболочку (экран)

или диэлектрическую трубку (рис. 2.9). Волна распространяется вдоль витков спирали со скоростью, близкой к скорости света c . При этом фазовая скорость волны (скорость ее продвижения вдоль спирали) оказы-

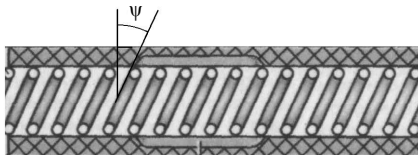


Рис. 2.9. Спиральная замедляющая система

вается равной $v = c \sin \psi$ (где ψ – угол намотки спирали) и близкой к скорости движения электронов. Резонаторная замедляющая система представляет собой волновод с набором диафрагм.

Замедляющая система характеризуется коэффициентом замедления n , равным отношению скорости распространения c электромагнитной волны в свободном пространстве к скорости ее распространения в среде, волноводе или замедляющей системе. Для электромагнитной волны в средах коэффициент замедления n называют показателем преломления. Различают коэффициент замедления фазовой скорости $n = c / v$ и коэффициент замедления групповой скорости $n_g = c / u$. Величины n и n_g связаны между собой формулой Рэлея:

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}, \quad (2.7)$$

что следует из соотношения между фазовой v и групповой u скоростями:

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}, \quad (2.8)$$

где $dv/d\lambda$ – дисперсия электромагнитной волны; $dn/d\lambda$ – дисперсия среды, в которой распространяется волна. Нормальной дисперсии волны соответствует убывание коэффициента замедления фазовой скорости с увеличением длины волны ($dn/d\lambda < 0$); аномальной дисперсии – возрастание n с увеличением λ ($dn/d\lambda > 0$). В зависимости от направления групповой скорости по отношению к фазовой дисперсия волны может быть положительной (направления скоростей совпадают) или отрицательной (групповая скорость направлена противоположно фазовой). Дисперсия создается неоднородностями среды, в частности, замедляющей системой. Отрицательная дисперсия используется в замедляющих системах ламп обратной волны, положительная – в замедляющих системах ламп бегущей волны.

Источники СВЧ излучения являются монохроматическими. Частота микроволнового СВЧ излучения, испускаемого генераторными лампами, задается параметрами колебательного контура, создаваемого межэлектродными емкостями и индуктивностями электродов лампы (см. формулу (2.3)); частота излучения, генерируемого лампами обратной волны магнетронного типа, зависит от размеров резонаторов, а также задается анодным напряжением, ускоряющим электроны. Изменением ускоряющего напряжения можно перестраивать частоту СВЧ излучения.

Замедляющая система генератора является системой отбора энергии от электронного потока. Далее генерируемое СВЧ излучение необходимо вывести из генераторной лампы и передать его в требуемом направлении. Поскольку генераторная лампа является электровакуумным прибором, то в состав устройства вывода излучения входит диэлектрическое вакуумное уплотнение (окно), пропускающее электромагнитные волны, а также отрезки линии передачи с разъемами для подсоединения к системе отбора энергии и внешнему тракту (волноводу).

Генерация СВЧ излучения полупроводниковыми диодами (туннельным, лавинно-пролетным, диодом Ганна) основана на наличии в их вольтамперной характеристике спадающих участков, которым соответствует отрицательное сопротивление. Обусловлено отрицательное сопротивление специфическими эффектами при движении носителей тока в таких диодных структурах, приводящими к запаздыванию тока диода

по фазе относительно напряжения. Это позволяет электрическую энергию постоянного тока преобразовывать в энергию электромагнитных СВЧ колебаний.

Формирование потоков сверхвысокочастотного излучения.

Передача СВЧ излучения в определенном направлении с возможностью изменения направления передачи осуществляется с применением волноводов. Волноводы для электромагнитных волн обычно представляют собой полые или частично заполненные диэлектриком металлические трубы либо стержни из диэлектрика (рис. 2.10). По сравнению с двухпроводными линиями передачи радиоволноводы позволяют передавать большую мощность с меньшими потерями. Преимущественное распространение получили волноводы прямоугольного сечения. Полые волноводы используются в диапазоне длин волн 0,2–30 см; металлические волноводы, частично заполненные диэлектриком (преимущественно прямоугольного и кругового сечений), применяются в диапазоне миллиметровых волн в основном для передачи сигналов повышенной мощности.

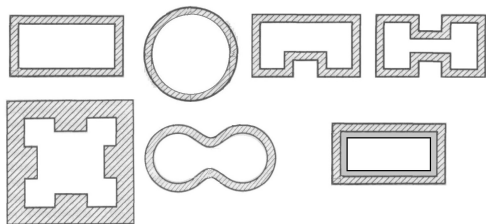


Рис. 2.10. Примеры поперечных сечений полых волноводов в виде металлических труб

Механизм распространения электромагнитной волны в волноводе обусловлен ее многократным отражением от стенок волновода. При наклонном падении электромагнитной волны на плоскую отражающую поверхность за счет наложения падающей и отраженной волн образуются: бегущая волна в направлении, параллельном отражающей поверхности, и стоячая волна, расположенная вдоль направления, перпендикулярного к этой поверхности. В узлы стоячей волны можно поместить идеально проводящую тонкую металлическую пластину без искажения поля. Такая пластина будет расположена параллельно отражающей поверхности на расстоянии от нее, равном длине стоячей волны. Образующаяся при отражении от обеих поверхностей бегущая волна будет переносить электромагнитную энергию.

Определим набор частот электромагнитного излучения, способного распространяться по волноводу. Рассмотрим волновод в виде металлической трубы прямоугольного сечения (рис. 2.11). Пусть поперечная электромагнитная волна распространяется по трубе вдоль оси x и плоскость колебаний вектора напряженности параллельна оси y . Напряженность высокочастотного электрического поля должна обратиться в нуль

на сторонах трубы, параллельных оси y (в узлах стоячей волны). Зависимость величины E_y от z можно представить периодической функцией:

$$\tilde{E}_y \sim \sin k_z z. \quad (2.9)$$

Вдоль трубы распространяется плоская электромагнитная волна, описываемая уравнением (2.2). Тогда

$$\tilde{E}_y = E_m \sin k_z z \sin 2\pi \left(vt - \frac{x}{\lambda} \right) = E_m \sin k_z z \sin(\omega t - k_x x), \quad (2.10)$$

где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота переносимых колебаний; $k_x = 2\pi / \lambda$ – проекция волнового вектора на ось x .

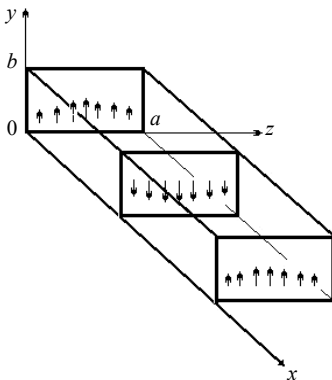


Рис. 2.11. Схема распределения электрического поля электромагнитной волны в прямоугольном волноводе

Равенство нулю касательных составляющих напряженности электрического поля определяется граничным условием $k_z a = n\pi$, где n – целое число, a – ширина трубы (условие образования узлов стоячей волны). В самом простом случае (при $n = 1$) $k_z = \pi / a$. Поскольку проекция E_y должна удовлетворять волновому уравнению для вектора \mathbf{E} электромагнитной волны:

$$\frac{\partial^2 \tilde{E}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{E}_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{E}_y}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \tilde{E}_y}{\partial t^2}, \quad (2.11)$$

то, подставляя (2.10) в (2.11) и дифференцируя, получим

$$k_x^2 \tilde{E}_y + k_z^2 \tilde{E}_y - \frac{\omega^2}{c^2} \tilde{E}_y = 0. \quad (2.12)$$

Поскольку $\partial \tilde{E}_y / \partial y = 0$, а $\tilde{E}_y \neq 0$, то волновое уравнение (2.11) выполняется при условии

$$k_x^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} = 0. \quad (2.13)$$

Отсюда проекция волнового вектора на ось x

$$k_x = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_z^2} = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\pi^2}{a^2}}. \quad (2.14)$$

Полученное соотношение позволяет оценить наименьшую (критическую) частоту ω_k волны, которая еще может распространяться в волноводе. Для этого проекция k_x должна принимать действительные значения. Следовательно, должно выполняться условие

$$\omega > \omega_k = \pi \frac{c}{a}. \quad (2.15)$$

В частности, в полом волноводе прямоугольного сечения с размером стороны $a = 1,5$ см могут распространяться электромагнитные волны с частотой $\nu > \nu_k = \frac{\omega_k}{2\pi} = \frac{c}{2a} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2}} = 1 \cdot 10^{10}$ Гц = 10 ГГц.

Набор частот электромагнитного излучения, способного распространяться по волноводу, определяется соотношением

$$\nu_n = n\nu_k = n \frac{c}{2a}. \quad (2.16)$$

Длина электромагнитной волны, распространяющейся по волноводу вдоль направления x , равна

$$\lambda_x = \frac{2\pi}{k_x} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\pi^2}{a^2}}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}}, \quad (2.17)$$

где $\lambda_0 = 2\pi(c/\omega)$ – длина волны, распространяющейся в свободном пространстве (без волновода).

Наряду с переменным электрическим полем в волноводе распространяется и магнитное поле, замкнутые силовые линии которого расположены параллельно плоскости xz .

Волноводы и резонаторы характеризуются волновым сопротивлением. Для полых волноводов различают волновое сопротивление

двух типов. Волновое сопротивление первого типа называется характеристическим сопротивлением и определяется отношением поперечных к оси волновода компонентов напряженностей электрического и магнитного полей. Оно не зависит от размера волновода и характеризует лишь тип волны в нем; для волн, используемых для передачи сигналов,

$$R_{\text{в}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{\lambda_{\text{в}}}{\lambda_0}, \quad (2.18)$$

где μ и ε – магнитная и диэлектрическая проницаемости среды в волноводе; $\lambda_{\text{в}}$ и λ_0 – длины волн соответственно в волноводе и свободном пространстве. Волновое сопротивление второго типа выражается как отношение амплитудных значений напряжения и тока в любом сечении волновода:

$$R_{\text{в}} = \frac{U_m}{I_m}. \quad (2.19)$$

Волновое сопротивление резонатора – величина, равная реактивной части полного сопротивления одной из ветвей (индуктивной или емкостной) параллельного колебательного контура, эквивалентного данному резонатору, при резонансной частоте ω_0 :

$$R_{\text{в}} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{U_m^2}{2\omega_0 W}, \quad (2.20)$$

где L и C – индуктивность и емкость параллельного контура; U_m – амплитуда напряжения между точками резонатора, по отношению к которым определяется волновое сопротивление; W – энергия, запасенная в резонаторе.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Приведите схему и поясните принцип действия лампового генератора электромагнитных колебаний.
2. Охарактеризуйте устройство и принцип действия металлокерамического генераторного триода – источника СВЧ излучения.
3. Объясните принцип действия объемного резонатора электромагнитных колебаний. Каков физический смысл уравнений Максвелла?
4. Охарактеризуйте устройство и принцип действия многорезонаторного магнетронного генератора СВЧ излучения.
5. В чем состоит суть условия синхронизма электронов и волн? Каким образом достигается условие синхронизма?

6. Поясните устройство и принцип действия замедляющих систем. Что понимают под коэффициентом замедления?
7. Каков физический смысл дисперсии волны? Перечислите и охарактеризуйте виды дисперсии электромагнитной волны.
8. Каким образом задается частота генерируемого электромагнитного СВЧ излучения?
9. Как осуществляется вывод СВЧ излучения из генератора?
10. Каким образом происходит передача электромагнитного СВЧ излучения в определенном направлении? Что представляют собой волноводы электромагнитного излучения?
11. Поясните механизм распространения электромагнитной волны в волноводе. Как определяется набор частот электромагнитного излучения, способного распространяться по волноводу определенного размера?
12. Перечислите основные характеристики волноводов и резонаторов. Уясните смысл этих характеристик.

2.2.2.2. Электромагнитное излучение оптического диапазона и характеристическое рентгеновское излучение

Источники излучения оптического и рентгеновского диапазонов.

Источниками электромагнитного излучения в инфракрасной и видимой областях спектра являются: лампы накаливания, газоразрядные лампы, светодиоды, твердотельные, газовые и полупроводниковые лазеры. В субмиллиметровом диапазоне в качестве источников инфракрасного излучения используют лампы обратной волны. Газоразрядные лампы и квантовые генераторы применяются в качестве источников ультрафиолетового излучения.

Газоразрядные источники света предназначены для получения оптического излучения в результате разряда в газах, парах или парогазовых смесях. Такие источники имеют, как правило, вакуумноплотную оболочку из тугоплавкого или кварцевого стекла, сапфира или другого прозрачного для излучения материала. В оболочку герметично вмонтированы металлические электроды, к которым подается электрическое напряжение и между которыми происходит электрический разряд. Для работы источников требуются специальные устройства, обеспечивающие зажигание электрического разряда в них. Большинство пусковых зажигающих устройств имеют импульсный повышающий трансформатор. При подаче на первичную обмотку трансформатора импульса тока в его вторичной обмотке индуцируется импульс высокого напряжения, достаточный для создания разряда между электродами.

В отличие от обычных ламп накаливания газоразрядные источники света обладают следующими особенностями: спектр излучения охватывает

широкую область оптического излучения (от десятых долей до единиц микрометров); излучение может генерироваться непрерывно во времени либо в виде отдельных или повторяющихся световых вспышек.

Газоразрядные источники света различаются по составу газа или паров, рабочему давлению, типу используемого разряда и др.

Импульсные лампы с ксеноновым наполнением обладают мощностью до нескольких киловатт, световой отдачей до 60 лм/Вт и сплошным спектром излучения, охватывающим инфракрасную, видимую и ультрафиолетовую области спектра. Используются, в частности, для накачки лазеров. Дуговые ксеноновые лампы непрерывного действия имеют спектр, близкий к солнечному в видимой области. Дуговые ртутные и ртутно-ксеноновые лампы имеют повышенную по сравнению с ксеноновыми долю излучения в ультрафиолетовой области.

Дуговые натриевые лампы низкого давления излучают практически монохроматический чисто желтый свет (дублет $\lambda = 0,569$ мкм и $\lambda = 0,5696$ мкм). Натриевые лампы высокого давления дают золотистобелый свет, обладают мощностью 100–1000 Вт и световой отдачей 75–140 лм/Вт. Кроме того, разработаны металлогалогенные лампы, спектр излучения которых зависит от состава применяемых галогенидов.

В измерительном оборудовании (интерферометрах, рефрактометрах, атомно-абсорбционных и атомно-флуоресцентных спектрофотометрах) в качестве эталонных источников света используются спектральные лампы небольшой мощности (обычно от единиц до десятков ватт). В безэлектродных спектральных лампах излучение определенного спектрального состава электромагнитным полем высокой частоты (~ 100 МГц) возбуждается в парах вещества (обычно металла), введенного в небольшом количестве в колбу лампы. В лампах тлеющего разряда с цилиндрическим полым катодом излучение возникает в полости катода при возбуждении разрядом испаренных атомов металла – материала катода. Для изготовления катодов таких спектральных ламп используются Ag, Au, Fe, Ni, Al, Ti и другие металлы, атомы которых обладают дискретными спектрами испускания. Разработаны спектральные лампы с комбинированным разрядом, позволяющие получать интенсивные узкие спектральные линии различных металлов. Такие лампы имеют оболочку цилиндрической формы с окном для выхода излучения на торце, содержат один или несколько сквозных полых катодов. В отличие от ламп с полым катодом в лампах с комбинированным разрядом получение и возбуждение паров вещества осуществляются раздельно: испарение вещества катода происходит в тлеющем разряде в полости катода, а возбуждение паров – в положительном столбе дугового разряда, пронизывающего полый катод.

В качестве источников сплошного ультрафиолетового излучения в области длин волн 0,15–0,33 мкм используются водородные и дейтериевые спектральные лампы дугового разряда.

Принцип действия тепловых и газоразрядных источников оптического излучения основан на спонтанном испускании электромагнитной энергии атомами или молекулами вещества при их переходе из возбужденных состояний. Процессы, сопровождающие электронные переходы в атомах, подробно рассмотрены в разд. 2.4, а процессы, происходящие в газовых разрядах, – в подразд. 2.3.2. Возбуждение атомов и молекул осуществляется за счет подвода энергии извне: электрической, преобразованной в тепловую, – в лампах накаливания и непосредственно электрической – в газоразрядных лампах.

Источниками излучения в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра являются также излучающие полупроводниковые приборы, в частности излучающие диоды и светодиоды. Их действие основано на явлении инжекционной электролюминесценции, обусловленной спонтанной рекомбинацией инжектируемых неосновных носителей заряда. В таких приборах энергия неосновных неравновесных носителей заряда, инжектированных под действием приложенного напряжения в активную область полупроводника, прилегающую к p – n -переходу, преобразуется в энергию оптического излучения. Такое излучение некогерентно, однако, в отличие от тепловых и газоразрядных источников света, имеет более узкий спектр.

Источниками монохроматического электромагнитного излучения, а также усилителями такого излучения являются квантовые генераторы и усилители – устройства для генерирования и усиления электромагнитных волн посредством вынужденного излучения фотонов микрочастицами (атомами, молекулами, ионами, электронами). Созданы квантовые генераторы, работающие в различных диапазонах электромагнитного излучения: квантовые генераторы микроволнового СВЧ диапазона (мазеры), длинноволнового инфракрасного излучения (иразеры), ближнего инфракрасного и видимого излучений (лазеры), ультрафиолетового излучения (ультрафиолетовые лазеры), рентгеновского излучения (рентгеновские лазеры), γ -излучения (γ -лазеры).

Лазерное излучение и усиление в квантовых генераторах и усилителях происходит в результате вынужденного излучения и взаимодействия электромагнитного излучения с активной средой, в которой создается инверсия населенностей. В основе работы лазеров лежит способность возбужденных атомов, молекул или кристаллов под действием внешнего электромагнитного излучения соответствующей частоты

совершать квантовые переходы и усиливать это излучение. Возбужденные частицы могут отдавать свою энергию двумя способами – самопроизвольно (спонтанное излучение) и под воздействием внешнего излучения той же частоты (вынужденное излучение). Процесс вынужденного излучения развивается очень быстро, поэтому все возникшие фотоны излучаются практически одновременно, и кванты вынужденного излучения неотличимы от первичных возбуждающих фотонов. Они обладают той же частотой, фазой, поляризацией и направлением распространения, т. е. лазерное излучение является когерентным и поляризованным. При вынужденном излучении происходит когерентное усиление электромагнитного излучения.

Лазер содержит три основных компонента: активную среду, в которой создается инверсия населенностей; устройство для создания инверсии в активной среде (систему накачки энергии); оптический резонатор. Система возбужденных атомов или молекул (активная среда) может усиливать падающее излучение, если она находится в состоянии с инверсией населенностей. Для одного электрона вынужденные переходы, сопровождающиеся поглощением и излучением кванта электромагнитной энергии, равновероятны. Когерентное усиление возможно только при превышении числа возбужденных частиц над невозбужденными, т. е. при наличии инверсии населенностей.

Инверсия населенностей – неравновесное состояние вещества, при котором населенность электронами составляющих его частиц (атомов, молекул) более высокоэнергетических состояний выше, чем состояний с меньшей энергией. В настоящее время найдены сотни материалов – твердых тел, жидкостей и газов, – обладающих способностью к инверсии. Для атомов или молекул этих веществ характерны метастабильные энергетические состояния, время жизни в которых составляет $\sim 10^{-2}$ – 10^{-3} с, что значительно выше, чем в обычных состояниях (10^{-15} – 10^{-16} с).

В качестве примера рассмотрим принцип действия газового гелий-неонового лазера. На рис. 2.12 представлены схема энергетических уровней атомов гелия и неона в таком лазере и соответствующие электронные переходы. Значения энергии электронов на энергетических уровнях в электронвольтах (эВ) указаны относительно основного состояния атомов.

Рабочим веществом гелий-неонового лазера являются нейтральные атомы неона. В электрическом разряде за счет соударения с электронами часть атомов Ne переходит из основного $2p$ -состояния в возбужденное $5s$ -состояние. Однако в чистом неоне время жизни электронов на этом уровне мало, они быстро переходят на уровни $2p$ и $3p$, что препятствует созданию достаточно высокой инверсии населенностей для пары уров-

ней $5s$ и $3p$. Примесь гелия существенно меняет ситуацию. Первый возбужденный $2s$ -уровень атома гелия практически совпадает по значению энергии с возбужденным $5s$ -уровнем атома неона. Поэтому при взаимодействии возбужденных атомов гелия с невозбужденными атомами неона происходит передача возбуждения, в результате которой атомы неона возбуждаются на уровень $5s$, а атомы гелия переходят в основное невозбужденное состояние.

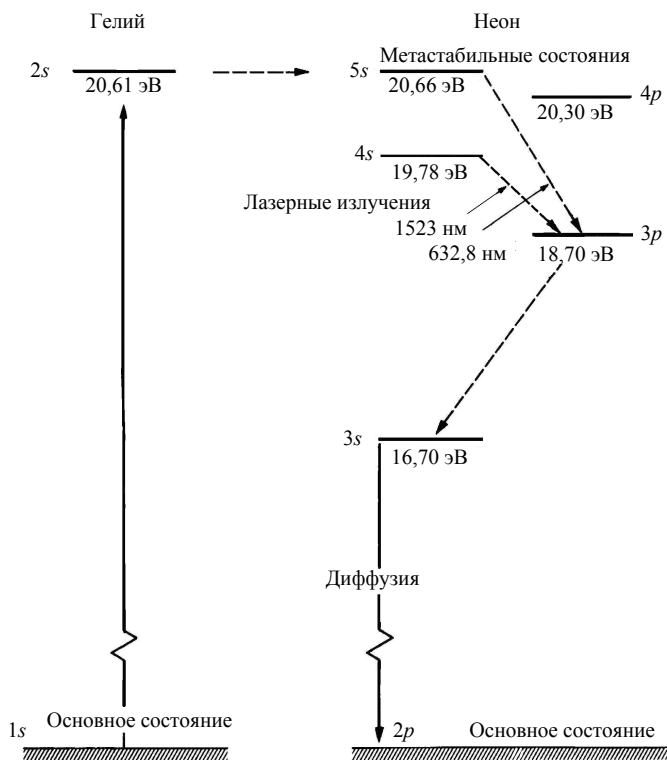


Рис. 2.12. Схема энергетических уровней рабочих атомов Ne и вспомогательных атомов He в гелий-неоновом лазере

При достаточно большом числе атомов гелия в газовой смеси можно добиться преимущественного заселения $5s$ -уровней атомов неона. Инверсии населенностей способствует и диффузионный переход электронов из $3s$ -состояний при соударениях со стенками газоразрядной камеры.

Лазерное излучение испускается при переходе электронов из метастабильных $5s$ -, а также $4s$ -состояний атомов неона в $3p$ -состояние.

Видимой области спектра принадлежит наиболее интенсивное излучение с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм. Энергетические уровни атомов неона имеют сложную структуру (расщеплены на подуровни). Поэтому гелий-неоновый лазер может работать на тридцати длинах волн в области видимого света и инфракрасного излучения.

Необходимую для возбуждения генерации электромагнитного излучения положительную обратную связь осуществляет оптический резонатор, в который помещается активная среда. В какой-то точке среды происходит спонтанный переход электрона с верхнего энергетического уровня на нижний с испусканием фотона. Если резонатор настроен на частоту этого фотона, то фотон не выходит из резонатора, а, многократно отражаясь от его стенок, воздействует на активную среду, вызывая все новые акты вынужденного испускания таких же фотонов (обратная связь). В результате в резонаторе накапливается электромагнитная энергия, часть которой можно вывести наружу в строго определенном направлении. В качестве стенок оптического резонатора используется система двух зеркал, расположенных строго параллельно друг другу; лазерное излучение выводится через одно из зеркал (полупрозрачное для излучения).

В твердотельных лазерах, таких как рубиновый, накачка энергии с целью перевода активной среды в возбужденное состояние и создания инверсии населенностей осуществляется от мощных газоразрядных ламп. В газовых лазерах накачка энергии происходит за счет электрической энергии, подводимой для возбуждения газового разряда. Активной средой жидкостных лазеров чаще всего являются растворы органических красителей. С применением дифракционной решетки или призмы можно в пределах полосы люминесценции перестраивать частоту излучения жидкостных лазеров. Кроме того, в одном лазере можно использовать набор различных красителей, излучающих на различных длинах волн. Накачка энергии осуществляется другим лазером.

В последнее время широкое распространение в системах оптической записи информации получили полупроводниковые лазеры, излучающие в основном в ближней инфракрасной области спектра ($\lambda = 0,6\text{--}10$ мкм). Эти лазеры отличаются миниатюрностью, устойчивостью к механическим воздействиям, имеют большой срок службы, легко управляются электронным способом, работают при низких напряжениях и, что очень важно, изготавливаются по стандартной технологии микроэлектроники, т. е. пригодны для массового производства, и поэтому дешевы.

Принцип действия полупроводникового лазера состоит в использовании излучательной рекомбинации электронно-дырочных

пар в полупроводнике, которая и приводит к лазерной генерации. Основным рабочим элементом лазера является p – n -переход между двумя сильно легированными областями полупроводника с электронной и дырочной проводимостью, характеризуемыми высокими концентрациями электронов и дырок. При подаче на p – n -переход прямого напряжения вблизи перехода появляется область перекрытия, где велики концентрации как электронов, так и дырок. Эта область называется активной, так как именно здесь происходит излучательная рекомбинация электронно-дырочных пар. Поддержание процесса излучения в полупроводниковом лазере осуществляется компенсацией убыли рекомбинирующих электронов и дырок за счет инжекции неравновесных основных носителей заряда при пропускании электрического тока в прямом направлении p – n -перехода. Таким образом осуществляется наиболее часто применяемая инжекционная накачка полупроводниковых лазеров на p – n -переходах и гетеропереходах. Разработаны также полупроводниковые лазеры с накачкой энергии путем облучения электронным пучком, за счет электрического пробоя (стримерные лазеры) и с оптической накачкой.

Генерация когерентного излучения в полупроводниковых лазерах с инжекционной накачкой осуществляется в результате инжекции носителей заряда через электронно-дырочный переход, благодаря которой имеет место непосредственное преобразование электрической энергии в лазерное излучение.

Активный элемент инжекционного лазера содержит активную область, представляющую собой p – n -переход, и примыкающие к ней слои полупроводников с электронной и дырочной проводимостью, выполняющие роль эмиттеров (инжекторов) соответственно электронов и дырок (рис. 2.13). Оптический резонатор лазера образуется двумя зеркальными параллельными гранями полупроводниковой структуры.

При приложении к активному элементу прямого внешнего напряжения из зоны проводимости эмиттера электронов в зону проводимости активной области инжектируются электроны, а из валентной зоны эмиттера дырок в валентную зону активной области – такое же

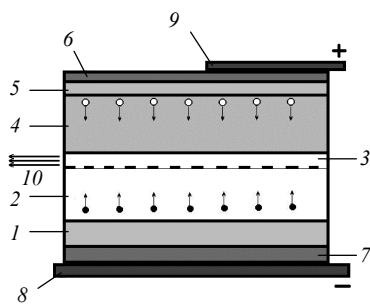


Рис. 2.13. Схема активного элемента полупроводникового инжекционного лазера: 1 – полупроводниковая подложка; 2 – эмиттер электронов; 3 – активная излучающая область; 4 – эмиттер дырок; 5 – подконтактный полупроводниковый слой; 6, 7 – контактные металлические слои; 8, 9 – токоподводы; 10 – лазерное излучение

количество дырок (что эквивалентно уходу электронов из валентной зоны активной области в валентную зону эмиттера дырок). Инжектированные в активную область электроны и дырки рекомбинируют между собой с излучением фотонов (рекомбинационное излучение). Длина волны рекомбинационного излучения определяется шириной запрещенной зоны активной области ($\lambda \sim 1 / \Delta E$).

При малых значениях силы тока, протекающего через полупроводниковую структуру, рекомбинационное излучение является спонтанным, что лежит в основе принципа действия некогерентных полупроводниковых излучающих приборов, в том числе светодиодов.

С увеличением тока в активной области создается инверсия населенностей носителей заряда. При дальнейшем увеличении силы тока вначале происходит усиление излучения за счет индуцированных излучательных переходов, а затем (когда приращение энергии за счет усиления превысит суммарные потери в оптическом резонаторе) возникает генерация лазерного излучения соответствующей длины волны.

Наиболее распространенными источниками рентгеновского излучения являются рентгеновские трубки. Рентгеновская трубка (рис. 2.14) представляет собой электровакуумный прибор. Накаляемый

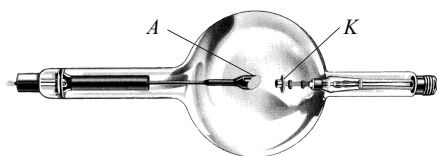


Рис. 2.14. Рентгеновская трубка

катод K , входящий в состав электронной пушки, является источником электронов. Между катодом и металлическим анодом (антикатодом) A прикладывается напряжение в несколько десятков киловольт для ускорения электронов. Ускоренные электроны бом-

бардируют анод. За счет торможения электронов при соударении с анодом возбуждается тормозное рентгеновское излучение, имеющее сплошной спектр. Кроме того, энергия электронов затрачивается на возбуждение атомов материала анода и образование электронных вакансий на их внутренних электронных оболочках. При переходе электронов атомов металла на эти вакансии испускаются кванты электромагнитного излучения, соответствующие характеристическому рентгеновскому излучению. Более подробно механизм испускания рентгеновского излучения и структура рентгеновских спектров рассмотрены в подразд. 2.4.5.

Источниками γ -излучения, используемого в аналитических целях, являются специальные радиоактивные препараты; γ -излучение испускается ядрами атомов при их переходах из возбужденных состояний и характеризуется линейчатой структурой спектров. Иссле-

дование характеристик γ -излучения, испускаемого ядрами атомов при радиоактивном распаде и в ядерных реакциях, лежит в основе γ -спектроскопии.

Основные характеристики источников света и потоков оптического электромагнитного излучения (см. прил. 6) подразделяют на энергетические и световые. Энергетические фотометрические величины характеризуют энергетические параметры оптического излучения безотносительно к его действию на определенные приемники этого излучения. Световые фотометрические величины определяют по отношению к так называемому среднему человеческому светоадаптированному глазу. Поскольку фотометрические величины зависят от частоты излучения, то введены их спектральные плотности, которые определяются как производные от интегральных величин по частоте или длине волны.

Монохроматизация излучения оптического и рентгеновского диапазонов. Для аналитических целей обычно требуется монохроматическое излучение (излучение со строго заданной частотой, или энергией квантов). Получение монохроматического электромагнитного излучения оптического диапазона может достигаться следующими способами:

- использованием источников монохроматического излучения;
- выделением отдельных спектральных линий из спектров, получаемых с применением спектральных приборов (дисперсионных призм, монохроматоров и дифракционных решеток);
- использованием фильтров, пропускающих излучение определенного частотного интервала.

Характеристическое рентгеновское излучение имеет линейчатый спектр, и при выделении из него линии определенной серии получается практически монохроматическое излучение. При необходимости может осуществляться дополнительная монохроматизация излучения путем его отражения от монокристалла. Поток рентгеновского излучения, претерпевшего рассеяние от определенной кристаллографической плоскости монокристалла под углом θ , обладает, в соответствии с условием Брэгга – Вульфа, строго заданной длиной волны λ :

$$2d \sin \theta = m\lambda, \quad (2.21)$$

где d – межплоскостное расстояние в монокристалле; m – целое число. С целью фокусировки потока отраженного от монокристалла рентгеновского излучения используется изогнутый монокристалл, поверхность изгиба которого представляет часть сферической или цилиндрической поверхности. При этом принимается во внимание, что если

радиус изгиба кристалла равен r_0 , а источник излучения размещается на окружности радиуса $r_0 / 2$, касательной к кристаллу, то отраженный поток будет фокусироваться в других точках той же окружности (окружность Роуланда).

Формирование потоков оптического электромагнитного излучения. Полученное в соответствующем источнике и монохроматизированное излучение в измерительной системе направляется на исследуемое вещество, а после взаимодействия – на систему регистрации. В оптической спектроскопии анализируется структура спектров излучения, испускаемого самим анализируемым веществом.

В открытом пространстве передача электромагнитной энергии оптического диапазона возможна только в пределах прямой видимости и связана с потерями вследствие расходимости, рассеяния и поглощения. Для направленной передачи электромагнитного излучения используются оптические волноводы, называемые световодами.

По конструкции различают световоды линзовые, волоконные, планарные и полосковые. Линзовый световод – система последовательно расположенных линз, а также зеркал и призм, заключенных в трубу.

Волоконный световод представляет собой волокно (тонкую гибкую нить) из прозрачного для данного вида излучения диэлектрического материала, внутренняя часть которого имеет показатель преломления больший, чем показатель преломления внешней части. Распространяющиеся вдоль волокна электромагнитные волны при достаточно небольших углах между направлением распространения и осью волокна испытывают

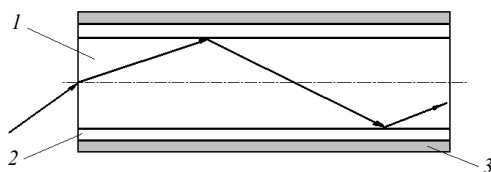


Рис. 2.15. Принцип действия волоконного световода:

1 – оболочка; 2 – центральное волокно (ядро световода); 3 – защитный полимерный слой

полное внутреннее отражение на границе раздела сердцевины и оболочки. Вследствие этого излучение не выходит наружу, а в процессе многократных отражений от оболочки распространяется вдоль волокна (рис. 2.15).

Принцип действия планарного и полоскового световодов также основан на полном внутреннем отражении излучения от наружной части. Эти световоды представляют собой тонкие пленки, нанесенные на однородную подложку, толщина (и ширина) которых порядка длины волны излучения.

Характер прохождения оптического излучения зависит от поперечных размеров световода и распределения величины показателя преломления

по его сечению. Число типов (мод) оптических электромагнитных колебаний, которые могут распространяться в волоконном световоде, пропорционально квадрату диаметра его сердцевины и разности между показателями преломления сердцевины и оболочки. Уменьшая произведение этих величин, можно получить условие, при котором по световоду будет распространяться только один тип колебаний (одномодовый световод). Многомодовые световоды могут быть ступенчатыми (ступенчатое изменение показателя преломления по сечению) и градиентными (плавное изменение показателя преломления по сечению). В одномодовых световодах диаметр сердцевины составляет 5–10 мкм, в многомодовых – от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки, как правило, составляет десятые доли процента для одномодовых и 1–2% для многомодовых световодов. Полный диаметр волоконного световода составляет 0,1–1 мм.

Широкое распространение получили волоконно-оптические (оптоволоконные) линии направленной передачи световой энергии и информационных сигналов, имеющих электромагнитную природу, на значительные (в сотни километров) расстояния. Линии прокладываются с применением волоконно-оптического кабеля. Кабель представляет собой набор волоконных световодов, заключенных в защитную оболочку вместе с упрочняющими элементами (рис. 2.16).



Рис. 2.16. Волоконно-оптический кабель

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Перечислите типы источников электромагнитного излучения оптического диапазона.
2. Поясните принцип действия тепловых и газоразрядных источников света.
3. В чем состоит суть процесса вынужденного излучения электромагнитной энергии лазерами? Перечислите отличительные особенности лазерного излучения.
4. Назовите и кратко охарактеризуйте основные компоненты лазера. Что представляют собой: активная среда; оптический резонатор?
5. Что понимают под инверсией населенностей?
6. Поясните принцип действия гелий-неонового лазера.
7. Каким образом осуществляется накачка энергии в газовых и твердотельных лазерах?
8. Поясните принцип действия и опишите отличительные особенности полупроводниковых лазеров на $p-n$ -переходах.

9. Каков принцип действия источника рентгеновского излучения – рентгеновской трубки?
10. Какие фотометрические величины (см. прил. 6) относятся к энергетическим? Уясните смысл и единицы измерения этих величин.
11. Какие из фотометрических величин (см. прил. 6) относятся к световым? Уясните смысл и единицы измерения этих величин.
12. Перечислите способы получения монохроматического электромагнитного излучения оптического диапазона.
13. Объясните принцип монохроматизации рентгеновского излучения.
14. Поясните принцип действия оптических волоконных световодов и оптоволоконных линий передачи электромагнитных сигналов.

2.2.3. Регистрация и спектрометрия электромагнитного излучения

При измерении состава веществ требуется регистрация электромагнитного излучения после его взаимодействия с исследуемым веществом или излучения, возбужденного из вещества под воздействием анализирующего излучения другой природы. Наряду с обнаружением (детектированием) анализируемого излучения во многих методах измерений необходимо определять его спектральный состав (распределение электромагнитной энергии по частотам или длинам волн).

Способы регистрации и спектрометрии электромагнитного излучения существенно зависят от его вида.

Регистрация и спектрометрия сверхвысокочастотного излучения. Регистрация и определение частоты и энергии или мощности (спектрометрия) СВЧ излучения могут быть осуществлены на принципах приема излучения антенной и настройки приемника излучения в резонанс с регистрируемым излучением. Резонансная частота (частота регистрируемого электромагнитного излучения) практически равна частоте собственных колебаний приемника. Настройка приемника в резонанс может осуществляться изменением параметров его колебательной системы (размеров объемных резонаторов, значения анодного напряжения). При достижении резонанса резко увеличивается амплитуда электрического сигнала, регистрируемого приемником и являющегося откликом на сигнал анализируемого излучения. При необходимости регистрируемый сигнал может подвергаться усилению.

При этом излучение регистрируется приемно-усилительной системой. Основным элементом такой системы является при частоте принимаемого СВЧ излучения до 300 МГц приемно-усилительная лампа, а при более высоких частотах, вплоть до 300 ГГц, – лампа бегущей волны магнетронного типа. Регистрируемое СВЧ излучение вводится в соот-

ветствующую лампу приемно-усилительной системы. Для регистрации частоты излучения производится настройка колебательной системы лампы в резонанс с принимаемым излучением. Далее осуществляется усиление излучения, его вывод из лампы и направление по волноводу на детектор. При этом регистрируется мощность падающего на детектор высокочастотного излучения по изменению силы тока в цепи детектора. Механизм усиления СВЧ излучения приемно-усилительными лампами и лампами магнетронного типа аналогичен механизму генерации излучения этими приборами (см. п. 2.2.2.1).

Принцип действия ламп бегущей волны основан на механизме длительного взаимодействия электронного потока с полем бегущей электромагнитной волны. На рис. 2.17 схематично представлено устройство лампы бегущей волны О-типа, в которой постоянные электрическое и магнитное поля параллельны.

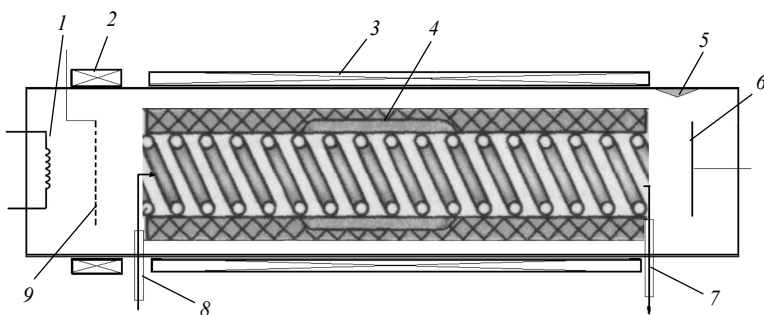


Рис. 2.17. Схема лампы бегущей волны:

- 1 – катод; 2 – магнитная линза; 3 – соленоид; 4 – замедляющая система;
5 – поглотитель; 6 – коллектор электронов; 7 – выход СВЧ излучения;
8 – ввод СВЧ излучения; 9 – анод

Электронная пушка, включающая эмиссионный катод 1 и ускоряющий анод 9, формирует электронный пучок с определенным сечением и интенсивностью. Скорость электронов определяется ускоряющим напряжением. С помощью фокусирующей системы, состоящей из короткой магнитной линзы 2 и создающего продольное магнитное поле длинного соленоида 3, расположенных снаружи, обеспечивается необходимое поперечное сечение пучка на всем пути вдоль спиральной замедляющей системы 4. В пространство взаимодействия, в котором расположена замедляющая система и движется поток ускоренных электронов, вводится по волноводу регистрируемое СВЧ излучение. В замедляющей системе напряженность электрического поля электромагнитной волны имеет составляющую, направленную вдоль оси прибора, с которой

и происходит взаимодействие электронов при выполнении условия синхронизма электронов и волн. В результате этого взаимодействия электроны в зависимости от фазы колебаний электрического поля волны ускоряются или тормозятся. При торможении электроны отдают свою энергию электромагнитному полю волны, усиливая тем самым входной сигнал. Усиленное СВЧ излучение направляется по волноводу или коаксиальному кабелю на регистрирующее устройство. Электроны, прошедшие замедляющую систему, осаждаются на коллекторе 6. Вблизи коллектора электронов расположен поглотитель 5 части электромагнитного излучения, отраженной от выхода 7.

Измерение мощности СВЧ излучения может быть произведено приборами, основанными на тепловом и пондеромоторном действиях высокочастотной энергии. В первом из этих способов используется закон сохранения энергии СВЧ излучения при ее превращении в теплоту, которая измеряется калориметрическими методами; во втором измеряется механическое давление электромагнитной волны на поверхность датчика.

Регистрация и спектрометрия оптического излучения. Регистрация и спектрометрия оптического электромагнитного излучения (инфракрасного, видимого и ультрафиолетового) производятся приемниками оптического излучения и соответствующими спектральными приборами. Приемниками видимого оптического излучения являются органы зрения. В измерительных устройствах используются приемники, реагирующие на интенсивность излучения и преобразующие энергию оптического излучения в другие виды энергии (тепловую, электрическую, механическую и т. д.), удобные для непосредственного измерения.

Приемники оптического излучения, принцип действия которых основан на повышении температуры вещества чувствительного элемента, вызывающего, в свою очередь, изменение других параметров вещества, называются тепловыми. Наиболее распространенными приемниками этого типа являются металлические и полупроводниковые болометры и термоэлементы. Действие болометров основано на изменении электрического сопротивления металла или полупроводника, вызванном поглощением энергии падающего потока оптического излучения. Повышение под воздействием падающего оптического излучения температуры контакта разнородных материалов, составляющих термоэлемент, приводит к возникновению термоЭДС, пропорциональной потоку излучения.

Принцип действия пироэлектрических приемников излучения основан на поляризации кристаллических диэлектриков (пироэлектриков, в частности сегнетоэлектриков) при изменении их температуры.

В оптико-акустических и пневматических (газовых, жидкостных) приемниках регистрируются либо увеличение объема поглощающей среды (ячейка Голея), либо акустические волны, возникающие в среде при поглощении оптического излучения.

Дилатометрические приемники оптического излучения основаны на использовании теплового расширения твердых тел.

Принцип действия фотоэлектрических приемников оптического излучения основан на внешнем и внутреннем фотоэффекте. Такие приемники непосредственно преобразуют электромагнитную энергию в электрическую. К ним относятся фотоэлементы, фотоэлектронные умножители, фоторезисторы, фотодиоды, электронно-оптические преобразователи и др. Поскольку фотоэффект обусловлен взаимодействием фотонов с электронами вещества чувствительного элемента, то отклик фотоэлектрических приемников зависит от энергии квантов регистрируемого электромагнитного излучения, и такие приемники селективны.

Действие вакуумных фотоэлементов, фотоэлектронных умножителей и электронно-оптических преобразователей основано на внешнем фотоэффекте (фотоэлектронной эмиссии) – явлении испускания электронов твердыми телами в вакуум под действием электромагнитного излучения. Взаимодействие кванта электромагнитного излучения (фотона) с электроном вещества описывается уравнением Эйнштейна

$$h\nu = \Phi + E_k, \quad (2.22)$$

где $h\nu$ – энергия фотона; Φ – работа выхода электрона из вещества; E_k – кинетическая энергия эмиттировавшего фотоэлектрона. Уравнение (2.22) выражает закон сохранения энергии при фотоэффекте.

В вакуумном фотоэлементе электроны под действием падающего потока излучения эмиттируют из фотокатода, причем интенсивность электронной эмиссии пропорциональна падающему световому потоку. При приложении между фотокатодом и анодом фотоэлемента электрического напряжения в цепи анода возникает ток; сила тока насыщения также пропорциональна световому потоку.

Фотоэлектронные умножители предназначены для преобразования слабых световых сигналов в электрические. Принцип действия фотоумножителей основан на фотоэлектронной эмиссии из фотокатода и вторичной электронной эмиссии из дополнительных электродов. Фотоэлектронный умножитель, возможная схема которого приведена на рис. 2.18, состоит из фотокатода 1, нескольких (до 15–20) электродов (динодов) 3 с высоким коэффициентом σ вторичной электронной эмиссии и анода 2, являющихся коллектором вторичных электронов. Напряжение

на каждом последующем диноде относительно катода на 50–100 В выше, чем на предыдущем. Свет, падающий на катод, возбуждает эмиссию фотоэлектронов, которые, попадая последовательно на диноды, размножаются за счет вторичной электронной эмиссии. Коэффициент усиления тока $K_y = \sigma^n$, где n – количество динодов, может достигать 10^9 – 10^{11} , так что даже отдельные фотоэлектроны могут создавать на выходе фотоумножителя импульсы тока значительной амплитуды и, соответственно,

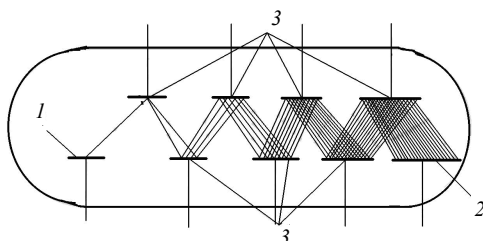


Рис. 2.18. Схема фотоэлектронного умножителя:
1 – фотокатод; 2 – анод; 3 – диноды

импульсы напряжения на выходном сопротивлении в цепи коллектора 2.

В фотоумножителях описанной выше конструкции усиление электронного потока осуществляется системой дискретных динодов. Существуют также фотоэлектронные умножители, умножительная система которых представляет собой непре-

рывный (канальный) динод в виде трубки (канала) с активным слоем на ее внутренней поверхности, обладающим распределенным электрическим сопротивлением. Перемещение вторичных электронов в канале происходит под действием электрического поля, направленного вдоль оси канала. Электроны, ускоренные полем, соударяясь со стенками канала, вызывают вторичную электронную эмиссию. Многократное повторение этого процесса в канале, длина которого в десятки раз больше диаметра, позволяет получать в умножителе с прямым каналом $K_y = 10^4$ – 10^5 , а в умножителе с изогнутым каналом (например, в виде спирали) $K_y = 10^7$ – 10^9 .

Электронные умножители, принцип действия которых основан на вторичной электронной эмиссии, применяются для усиления сигналов при регистрации не только электромагнитного излучения (фотонов), но и других частиц – электронов, ионов (корпускулярного излучения).

Разработаны также микроканальные пластины, представляющие собой сотовые структуры, образованные большим числом стеклянных трубок (каналов) диаметром 5–15 мкм с внутренней полупроводящей поверхностью, имеющей сопротивление, изменяющееся в пределах от 20 до 1000 МОм. Другими словами микроканальная пластина представляет собой сборку большого (несколько миллионов) количества канальных электронных умножителей. Когда налетающая частица (фотон, ион, электрон) попадает в канал, из его стенки выбиваются электроны, которые ускоряются электрическим полем, созданным на-

пряжением, приложенным к концам канала. Вторичные электроны летят по параболическим траекториям, пока не попадут на стенку, в свою очередь, выбивая еще большее количество вторичных электронов. Этот процесс по мере пролета вдоль канала повторяется много раз. По сравнению с фотоэлектронными умножителями микроканальные пластины имеют малые размеры (от нескольких миллиметров до нескольких дециметров), лучшие характеристики и заметно меньшую чувствительность к внешним магнитным полям.

Электронно-оптические преобразователи предназначены для преобразования невидимого глазом (в ИК, УФ и рентгеновских лучах) изображения объекта в видимое, а также для усиления яркости видимого изображения. В вакуумном электронно-оптическом преобразователе изображение объекта проецируется с помощью объектива на фотокатод. Электромагнитное излучение, попадающее от объекта, вызывает фотоэлектронную эмиссию с поверхности фотокатода, причем интенсивность эмиссии с различных его участков пропорциональна яркости спроецированного на него изображения. Фотоэлектроны ускоряются в вакууме электрическим полем по направлению к люминесцирующему экрану, фокусируются электронной линзой и бомбардируют экран, вызывая его люминесценцию. Интенсивность свечения отдельных точек экрана зависит от плотности потока фотоэлектронов, вследствие чего на экране возникает видимое изображение объекта.

В основе принципа действия полупроводниковых приемников оптического излучения лежит внутренний фотоэффект – возбуждение неравновесных носителей тока под действием электромагнитного излучения. Они являются избыточными над равновесными, концентрация которых обусловлена, в свою очередь, температурой полупроводника.

Увеличение электропроводности полупроводникового материала вследствие увеличения концентрации свободных носителей заряда в полупроводнике под действием электромагнитного излучения положено в основу принципа действия фоторезисторов.

Фотодиод – полупроводниковый приемник оптического излучения, обладающий односторонней фотопроводимостью вследствие наличия $p-n$ -перехода. Различают два режима работы фотодиода – фотодиодный и вентильный. При фотодиодном режиме работы во внешней цепи, так же как и в цепи фоторезистора, имеется источник постоянного тока, создающий на $p-n$ -переходе обратное запирающее напряжение. Возникающие под действием падающего электромагнитного излучения неосновные неравновесные носители тока диффундируют через $p-n$ -переход и ослабляют электрическое поле последнего. Сила фототока в фотодиоде

пропорциональна интенсивности падающего излучения и практически не зависит от напряжения смещения. При работе в вентильном режиме источник тока в цепи диода отсутствует. Внутреннее электрическое поле p - n -перехода ускоряет генерируемые электромагнитным излучением неосновные неравновесные носители тока. В результате происходит пространственное разделение неравновесных носителей разных знаков (электронов и дырок) и возникает фотоЭДС, значение которой пропорционально интенсивности падающего излучения.

Особенно широкое применение в настоящее время нашли приемники электромагнитного излучения, представляющие собой полупроводниковые приборы с зарядовой связью (ПЗС) – ПЗС-матрицы. В основе работы ПЗС лежит принцип хранения локализованного электрического заряда в потенциальных ямах, образуемых в кристалле полупроводника под действием внешнего электрического поля, и передачи этого заряда из одной потенциальной ямы в другую при изменении напряжения на внешних электродах. Приборы с зарядовой связью воспринимают электромагнитное излучение в диапазоне от рентгеновского до ближнего инфракрасного излучения и обладают самым широким спектральным диапазоном среди всех известных приемников излучения.

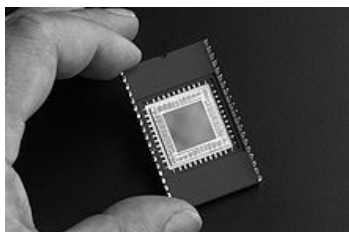


Рис. 2.19. ПЗС-матрица для преобразования ультрафиолетового и видимого диапазонов электромагнитного излучения

Используются приборы в цифровой видеосъемке, цифровой фотографии и во многих других устройствах.

ПЗС-матрица (рис. 2.19) – специализированная аналоговая интегральная микросхема, состоящая из светочувствительных фотодиодов, выполненная на основе кремния, использующая технологию ПЗС.

Рассмотрим принцип действия ячейки (пикселя) прибора с зарядовой связью (рис. 2.20), матрица которого сформирована на основе кремния p -типа, и основными носителями тока в ней являются дырки. В кремниевой подложке 5 сформированы путем легирования области 7 – каналы, обладающие n -типом проводимости. Над каналами создаются электроды 3 с изолирующими слоями 4 из оксида кремния. В фотоприемниках на основе ПЗС электроды выполняются из проводящего поликристаллического кремния или сплава индия с оксидом олова, обладающих оптической прозрачностью.

Если на электрод 3, называемый затвором, подать положительный потенциал, то электрическое поле, проникая в кремний через слой ди-

электрика 4, будет отталкивать подвижные дырки вглубь полупроводника. Образуется область 6 глубиной около 5 мкм, обедненная носителями тока, которая на энергетической диаграмме представляет собой потенциальную яму для неосновных носителей – электронов.

Электромагнитное оптическое излучение, падающее на пиксель и сфокусированное микролинзой 1, возбуждает в слое 7 кремния *n*-типа неравновесные носители тока, и возникшие вследствие внутреннего фотоэффекта электроны притягиваются электродом и накапливаются в тонком слое зоны потенциальной ямы 6 на границе раздела диэлектрик – кремний непосредственно под затвором. Накапливаемый при этом заряд пропорционален числу фотонов, попавших в пиксель.

Во всей матрице таких светочувствительных элементов получается двумерная матрица зарядов, пропорциональных яркости источника.

Полученную матрицу зарядов, отображающую распределение излучения по площади источника, необходимо считать и подать на усилитель, а затем преобразовать в цифровой сигнал. В основе процесса считывания и передачи зарядов лежит способность приборов с зарядовой связью обмениваться зарядами своих потенциальных ям. Если к электроду соседнего субпикселя приложить положительный потенциал большего значения, то образуется более глубокая потенциальная яма и электроны переходят в нее. Прикладывая к различным электродам матрицы ПЗС необходимые управляющие напряжения, можно обеспечить как хранение зарядов в тех или иных приповерхностных областях, так и направленное перемещение зарядов вдоль поверхности. Накопленные заряды сначала переносятся в секцию хранения, а далее пиксель за пикселем и строка за строкой – на выход матрицы. При этом строка зарядов преобразовывается в серию электрических импульсов, направляемых на усилитель.

Матрица является устройством, воспринимающим спроецированное на него изображение. Поскольку полупроводниковые фотоприемники примерно одинаково чувствительны ко всем цветам видимого спектра,

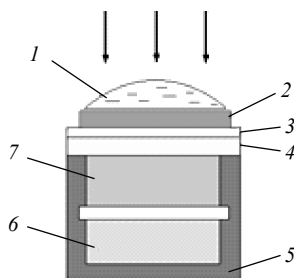


Рис. 2.20. Схема пикселя ПЗС-матрицы:
1 – микролинза; 2 – светофильтр (R, G или B); 3 – затвор (прозрачный электрод из поликристаллического кремния); 4 – диэлектрический слой оксида кремния; 5 – кремниевая подложка *p*-типа; 6 – зона потенциальной ямы, где собираются электроны из зоны генерации носителей заряда; 7 – канал *n*-типа (зона генерации носителей вследствие внутреннего фотоэффекта)

для восприятия цветного изображения каждый фотоприемник накрывается светофильтром одного из первичных цветов: красного, зеленого, синего (цветовая модель RGB).

Пондеромоторные (механические) приемники оптического излучения реагируют на световое давление.

К фотохимическим приемникам оптического излучения относятся все виды слоев фоточувствительных материалов. В отличие от фотоэлектрических и тепловых приемников фоточувствительный слой не только суммирует фотохимическое действие регистрируемого излучения, но и обладает способностью сохранять его в течение длительного времени.

Приемники оптического излучения всех типов являются измерительными преобразователями, и их свойства в процессе измерений описываются соответствующими характеристиками. Рассмотрим основные из характеристик. Порог чувствительности – минимальный поток излучения (который может быть обнаружен на фоне собственных шумов приемника), отнесенный к единице полосы рабочих частот. Коэффициент преобразования (чувствительность) – отношение выходного сигнала к падающему потоку излучения (входному сигналу). Постоянная времени – время, за которое сигнал на выходе нарастает до определенного уровня (95% от устанавливающегося значения); этот параметр служит мерой способности приемника регистрировать оптические сигналы минимальной длительности. Спектральная (частотная) характеристика определяет зависимость чувствительности приемника от частоты или длины волны излучения. Приемники, чувствительность которых слабо зависит от частоты в широком диапазоне частот, называют неселективными в отличие от селективных приемников, имеющих на спектральной характеристике четко выраженные максимумы или минимумы при определенных частотах.

Тепловые приемники оптического излучения, как правило, неселективны и пригодны для измерения потоков электромагнитной энергии в широкой области спектра ($\lambda = 0,2\text{--}50$ мкм). Порог чувствительности лучших тепловых приемников составляет $10^{-11}\text{--}10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2} при постоянной времени $10^{-3}\text{--}10^{-1}$ с.

Порог чувствительности приемников с внешним фотоэффектом может достигать значений $10^{-12}\text{--}10^{-15}$ Вт/Гц^{1/2} при постоянной времени 10^{-9} с. Предельная чувствительность фоторезисторов и фотодиодов равна $10^{-10}\text{--}10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2} при постоянной времени $10^{-5}\text{--}10^{-7}$ с. Основными характеристиками фотоэлектронных умножителей являются:

- световая анодная чувствительность – отношение анодного фототока к вызывающему его световому потоку при номинальных потенциалах электродов (составляет $1\text{--}10^4$ А/лм);

- спектральная чувствительность, равная спектральной чувствительности фотокатода, умноженной на коэффициент усиления умножительной системы;

- темновой ток – сила тока в анодной цепи в отсутствие светового потока (как правило, не превышает $10^{-9}\text{--}10^{-10}$ А).

Определение спектрального состава (спектрометрия) оптического электромагнитного излучения осуществляется с применением спектральных приборов. Оптический спектр представляет собой распределение интенсивности излучения по длинам волн, частотам или волновым числам. К оптическим спектральным приборам относятся: устройства для выделения достаточно узких участков спектра (монокроматоры); приборы, в которых приемник излучения регистрирует практически одновременно весь оптический спектр, развернутый в фокальной плоскости оптической системы прибора (спектрографы); приборы для сравнения измеряемого потока излучения с эталонным (спектрофотометры).

При реализации оптической спектрометрии анализируемое излучение вначале коллимируется с целью создания параллельного пучка путем пропускания через узкую прозрачную для излучения щель и оптическую систему. Коллиматор представляет собой вогнутое зеркало или собирающую линзу, в фокальной плоскости которых расположена щель. Коллимированное излучение направляется на спектральный прибор. Принцип действия оптических спектральных приборов основан чаще всего на пространственном разделении излучений, различающихся по длинам волн. Такое разделение возможно вследствие дисперсии или дифракции электромагнитных световых волн.

Дисперсия света – зависимость фазовой скорости световых волн в веществе от их частоты ν (длины волны λ) или показателя преломления вещества от этих же параметров (см. формулы (2.7), (2.8)). Дисперсия обусловлена взаимодействием переменного электрического поля световой волны с электронами атомов и молекул вещества. Согласно классическим представлениям, под действием электрического поля световой волны электроны атомов или молекул совершают вынужденные колебания с частотой, равной частоте волны. Для веществ, прозрачных в данной области спектра, фазовая скорость световой волны уменьшается, а показатель преломления увеличивается с увеличением частоты (уменьшением длины волны); такая зависимость называется нормальной дисперсией. При приближении частоты световой волны к собственной

частоте колебаний электронов наблюдается резонанс, обуславливающий поглощение света. Вблизи полос поглощения вещества имеет место обратная зависимость скорости и показателя преломления от частоты (длины волны) – аномальная дисперсия.

Следствием дисперсии является разложение пучка сложного некогерентного оптического излучения в спектр. Основным элементом спектральных приборов, действующих на этом принципе, являются дисперсионные призмы. Разделение излучения на монохроматические составляющие (спектральные линии) является результатом зависимости угла δ отклонения луча, прошедшего через призму, от показателя преломления n , различного для лучей разных длин волн (рис. 2.21). Вследствие зависимости показателя преломления материала призмы от длины волны λ лучи с различными ее значениями по-разному преломляются при входе в призму, а затем на выходе из нее. В зависимости от исследуемой области спектра применяются призмы из различных материалов: стекла (чаще всего из флинта) – для видимой области; кристаллического кварца, флюорита и других – для УФ области; кремния, германия, фторида лития, хлорида магния и других – для ИК области.

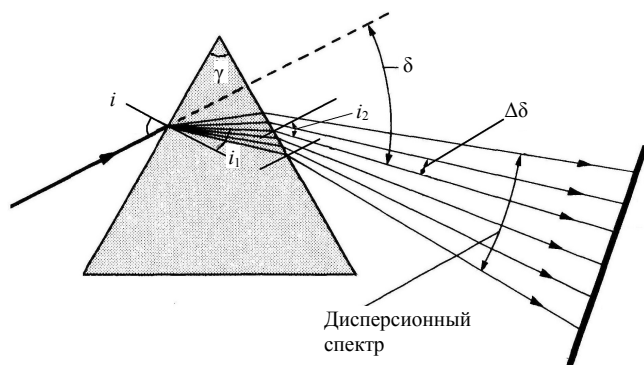


Рис. 2.21. Схема разложения некогерентного оптического излучения на дисперсионной призме

Дифракция света – это совокупность явлений, возникающих в процессе распространения света, связанных с отклонениями от законов геометрической оптики, в частности явление огибания лучами света контура непрозрачных тел и, как следствие, проникновение света в область геометрической тени. В спектральных приборах используется разложение сложного некогерентного оптического излучения вследствие дифракции на дифракционной решетке. Дифракционная

решетка – оптический прибор, представляющий собой периодическую структуру из большого числа регулярно расположенных элементов (например, параллельных равноотстоящих штрихов, нанесенных на плоскую или вогнутую поверхность), на которых происходит дифракция света. При этом наряду с дифракцией имеет место интерференция световых волн, проходящих через соседние щели.

Если на прозрачную плоскую дифракционную решетку, ширина прозрачных щелей которой равна b , а период решетки – d , направить параллельный пучок монохроматического света под углом α по отношению к нормали к плоскости решетки, то после фокусировки на экран света, прошедшего сквозь решетку, образуются интерференционные максимумы интенсивности (рис. 2.22). Условие образования главных максимумов определяется выражением

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = \pm m\lambda, \quad (2.23)$$

где β – угол отклонения светового луча от нормали после прохождения решетки (угол дифракции); m – порядок максимума (целое число, равное количеству длин волн, на которое волна от некоторого элемента щели отстает от такого же элемента соседней щели); λ – длина световой волны.

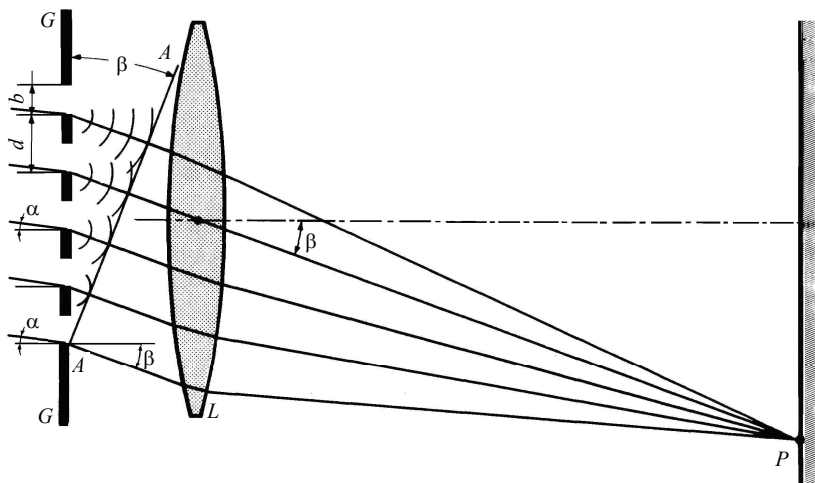


Рис. 2.22. Схема дифракции света на прозрачной дифракционной решетке

Максимумы расположены симметрично относительно центра дифракционной картины (нулевого максимума ($m = 0$)). Из (2.23) следует, что угол дифракции β при одном и том же значении m зависит от длины световой волны. И если на решетку направить сложное немонахроматическое

излучение, в состав которого входят волны с различными длинами λ , то в пределах каждого из главных максимумов будет наблюдаться спектр излучения. Немонохроматический свет раскладывается на монохроматические пучки, отклоняющиеся в пределах максимума одного и того же порядка m на различные углы. Изображения входной щели коллиматора, получаемые от этих пучков, называются спектральными линиями, а m – порядком спектра.

Различают прозрачные и отражательные дифракционные решетки. У прозрачных решеток штрихи, непрозрачные для света, наносятся на поверхность прозрачной (обычно стеклянной) пластинки, и наблюдение ведется в проходящем свете. У отражательной решетки штрихи наносятся на зеркальную (обычно металлическую) поверхность, и наблюдение ведется в отраженном свете. В современных спектральных приборах применяются, главным образом, отражательные дифракционные решетки.

Дифракционные решетки, используемые для работы в разных областях спектра, отличаются размерами, формой, материалом поверхности, профилем штрихов и частотой их нанесения. Частота штрихов для

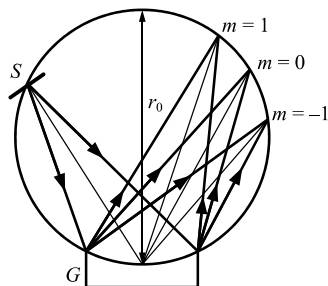


Рис. 2.23. Схема получения спектров с применением вогнутой отражательной дифракционной решетки

работы в рентгеновской области составляет около 6000 мм^{-1} , в ИК области – около $0,25 \text{ мм}^{-1}$. Для применения в УФ и видимой областях наиболее типичны решетки, имеющие от 300 до 1200 штрихов на миллиметр. Штрихи в таких решетках выполняются в тонком слое алюминия, нанесенном на стеклянную поверхность испарением в вакууме. Решетки для работы в области вакуумного ультрафиолета изготавливаются на стеклянных поверхностях и представляют собой вогнутые отражательные дифракционные решетки, дополнительно фокусирующие спектр. При этом используется геометрия расположения входной щели S

коллиматора и вогнутой дифракционной решетки G (рис. 2.23), соответствующая окружности Роуланда (как и при монохроматизации рентгеновских лучей посредством отражения от изогнутого монокристалла).

Основными характеристиками рабочих элементов (призм и дифракционных решеток) спектральных приборов являются угловая дисперсия и разрешающая способность.

Угловая дисперсия характеризует угловую ширину спектра и определяется как угол между двумя соседними спектральными линиями,

длины волн которых различаются на единицу: $\Delta\beta / \Delta\lambda$. Для данной длины волны угловая дисперсия дифракционной решетки зависит только от углов α и β и возрастает с увеличением β или порядка спектра:

$$\frac{\Delta\beta}{\Delta\lambda} = \frac{m}{d \cos\beta} = \frac{\sin\alpha + \sin\beta}{\lambda \cos\beta}. \quad (2.24)$$

Соотношение (2.24) можно получить дифференцированием по переменным β и λ условия получения главных максимумов (2.23). При нормальном падении излучения на дифракционную решетку ($\alpha = 0$) имеем:

$$d \sin\beta = m\lambda; \quad d \cos\beta \, d\beta = m \, d\lambda; \quad \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos\beta}.$$

В общем случае угол $\alpha = \text{const}$. Учитывая, что из (2.23)

$$\frac{m}{d} = \frac{\sin\alpha + \sin\beta}{\lambda},$$

и переходя к конечным приращениям $\Delta\beta$ и $\Delta\lambda$, получим формулу (2.24).

Угловая дисперсия спектральной призмы $\Delta\delta / \Delta\lambda$ зависит от материала призмы (показателя преломления n и дисперсии $dn / d\lambda \approx \Delta n / \Delta\lambda$), преломляющего угла γ призмы и угла падения i света на призму (а следовательно, от углов i_1 и i_2 преломления на каждой из граней призмы) (см. рис. 2.21):

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta\lambda} = \frac{\sin\gamma}{\sin i_1 \cos i_2} \frac{\Delta n}{\Delta\lambda}. \quad (2.25)$$

Разрешающая способность определяется отношением длины волны λ анализируемого излучения к наименьшему интервалу $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ длин волн, который еще может разрешить спектральный прибор ($R = \lambda / \Delta\lambda$). Распределение интенсивности спектральной линии имеет вероятностный характер и может быть представлено функцией нормального распределения Гаусса. Если имеются две близкие по длинам волн λ_1 и λ_2 спектральные линии одинаковой интенсивности, то, для того чтобы они разрешались по суммарной интенсивности, необходимо, в соответствии с критерием Рэлея, чтобы максимум интенсивности одной из линий совпадал по длине волны с минимумом другой (рис. 2.24).

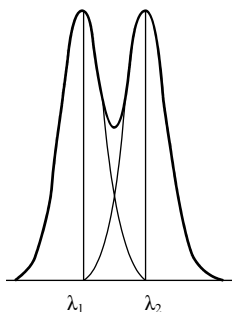


Рис. 2.24. Распределение интенсивности двух близких еще разрешаемых спектральных линий (критерий Рэлея)

В случае когда максимумы линий расположены ближе, по сумме интенсивностей будет наблюдаться одна более широкая линия; соседние спектральные линии при этом не разрешаются.

Условия получения двух близких спектральных линий одного и того же порядка с применением дифракционной решетки:

$$d \sin \beta_1 = m\lambda_1; \quad d \sin \beta_2 = m\lambda_2.$$

Для перехода от максимума спектральной линии с длиной волны λ_2 к ее минимуму необходимо, чтобы оптическая разность хода изменилась на величину λ_2 / N , где N – число штрихов решетки (число интерферирующих световых пучков). Минимум наблюдается в направлении β_{\min} , удовлетворяющем условию

$$d \sin \beta_{\min} = m\lambda_2 + \frac{\lambda_2}{N}.$$

В соответствии с критерием Рэлея, $\beta_1 = \beta_{\min}$, откуда

$$m\lambda_1 = m\lambda_2 + \frac{\lambda_2}{N}; \quad \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = mN.$$

Поэтому разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN = \frac{W}{\lambda} (\sin \alpha + \sin \beta), \quad (2.26)$$

где m – порядок спектра; N – общее число штрихов решетки; W – ширина всей решетки (ее заштрихованной области). При заданной геометрии дифракции (углах α и β) разрешающая способность может быть повышена только за счет увеличения N и W . Спектры соседних порядков могут накладываться друг на друга. Максимальный интервал длин волн, который можно наблюдать без наложения, называется свободной спектральной областью и определяется отношением минимальной длины волны спектрального интервала к порядку спектра:

$$F_\lambda = \frac{\lambda_{\min}}{m}. \quad (2.27)$$

Разрешающая способность спектральной призмы определяется в соответствии с критерием Рэлея из соотношения, что угловое расстояние между максимумами двух соседних спектральных линий больше или равно угловому расстоянию от максимума до ближайшего минимума. Она оказывается равной произведению длины l основания призмы на дисперсию ее показателя преломления:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = l \frac{\Delta n}{\Delta\lambda}. \quad (2.28)$$

Регистрация и спектрометрия рентгеновского и γ -излучений.

Регистрация рентгеновского и γ -излучений осуществляется с применением детекторов. Наибольшее распространение получили фоточувствительные детекторы, работа которых основана на изменении химического состава фоточувствительного материала под воздействием излучения. Используются ионизационные детекторы, вырабатывающие вследствие ионизации молекул газа электрический импульс, когда в рабочий объем детектора попадает квант излучения. К ионизационным детекторам относятся счетчик Гейгера – Мюллера и пропорциональный счетчик. Действие сцинтилляционных счетчиков основано на люминесценции, возникающей при взаимодействии жесткого электромагнитного излучения с веществом. Применяются также полупроводниковые детекторы излучений, в основе которых лежит генерация в полупроводнике неравновесных носителей тока под действием излучения. Для регистрации мягкого рентгеновского излучения используются фотоэлектронные умножители. Анализируемое рентгеновское или γ -излучение регистрируют по появлению электрических сигналов (импульсов тока или напряжения) на выходе детектора либо по почернению фотоэмульсии. Мерой интенсивности излучения служит сила тока на выходе детектора, средняя частота следования электрических импульсов, степень почернения фотоэмульсии и т. д.

Спектрометрия рентгеновского излучения по длинам волн осуществляется с применением спектральных приборов, принцип действия которых основан на дифракции. В качестве диспергирующих элементов, на которых происходит дифракция рентгеновских лучей, используются дифракционные решетки и кристаллы-анализаторы. Применяются вогнутые отражательные кристаллические решетки и изогнутые монокристаллы, геометрия расположения которых по отношению к входной и выходной щелям соответствует фокальной окружности Роуленда (рис. 2.25). Кристалл K (или решетка) с радиусом изгиба r_0 размещен на поверхности цилиндра или сферы радиуса $r_0/2$. Рентгеновское излучение от источника S проходит через узкую щель S_1 , расположенную на той же поверхности, и после дифракционного отражения от кристалла (решетки) фокусируется в плоскости щели S_2 , а затем попадает на детектор D .

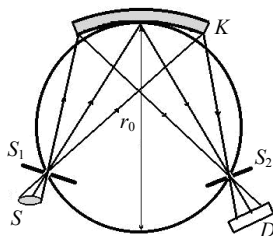


Рис. 2.25. Оптическая схема рентгеновского спектрометра с изогнутым кристаллом-анализатором

При дифракции на кристалле выполняется условие Брэгга – Вульфа (2.21); при дифракции на решетке – условие максимумов (2.23). В качестве диспергирующих элементов используются также плоские монокристаллы; при этом рентгеновское излучение, направляемое на кристалл и претерпевшее дифракционное рассеяние на его кристаллических плоскостях, с целью предотвращения расхождения пучка пропускают через многопластинчатые коллиматоры. Применяются также бездифракционные спектральные приборы, принцип действия которых основан на зависимости амплитуды импульсов электрических сигналов на выходе ионизационного детектора от энергии регистрируемых рентгеновских квантов.

Измерение энергии (спектрометрия по энергии квантов) характеристического рентгеновского излучения и γ -излучения осуществляется с применением методов, которые основаны на явлениях, обусловленных образованием электронов в регистрирующей среде под воздействием излучения, и определении характеристик этих электронов. К числу таких явлений относятся излучение Черенкова – Вавилова, переходное излучение и образование неравновесных электронно-дырочных пар в полупроводниках.

Эффект Черенкова – Вавилова – излучение света заряженными частицами (в частности, электронами) при их движении в среде с постоянной скоростью v_p , превышающей фазовую скорость v света в этой среде ($v_p > v = c/n$). Излучаемая частицей в каждый момент времени сферическая световая волна, распространяясь в среде со скоростью, меньшей скорости частицы, оказывается позади нее. Огибающая сферических волн, испускаемых частицей при ее движении, представляет собой коническую поверхность, которая и определяет фронт результирующего оптического излучения (рис. 2.26). Частица излучает в направлении, составляющем угол θ с направлением ее движения;

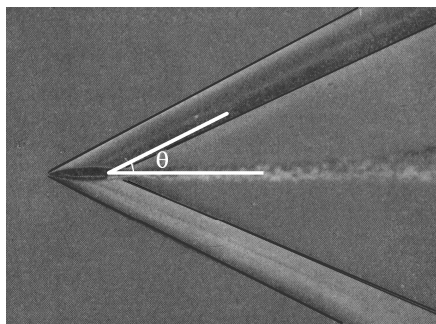


Рис. 2.26. Модель движения заряженной частицы в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света в среде

значения этого угла связано со скоростью частицы v_p и показателем преломления n среды соотношением

$$\cos \theta = \frac{c}{v_p} \frac{1}{n}, \quad (2.29)$$

где c – скорость света в вакууме. Угол θ и интенсивность излучения увеличиваются с ростом скорости частицы.

На эффекте Черенкова – Вавилова основан принцип действия применяемых в спектрометрии γ -излучения черенковских счетчиков полного поглощения. Анализируемые γ -кванты, попадая в соответствующую среду, взаимодействуют с электронами атомов и молекул среды. Основным механизмом взаимодействия является при этом комптоновское рассеяние фотонов на электронах. Фотоны γ -излучения и электроны отдачи движутся в среде, образуя электронно-фотонную лавину. Движущиеся с большой скоростью электроны испускают черенковское излучение. В черенковском счетчике полного поглощения электроны теряют энергию своего движения полностью. При этом количество излучаемого света пропорционально энергии первичного γ -кванта. Для обеспечения полного поглощения в качестве рабочей среды, называемой радиатором, используется стекло с высоким содержанием свинца; при толщине 40 см в нем может полностью затормозиться электрон с энергией до 10 ГэВ. Черенковское излучение с помощью оптической системы, состоящей из плоского зеркала и кварцевой линзы, разворачивается, фокусируется и направляется на катод фотоэлектронного умножителя. Зависимость угла θ и интенсивности излучения от скорости электронов позволяет определить кинетическую энергию электронов отдачи и получить распределение γ -квантов, участвующих в процессе комптоновского рассеяния, по энергиям. Основными характеристиками черенковских счетчиков являются эффективность регистрации и разрешающая способность по энергии γ -квантов.

Переходное излучение – излучение электромагнитных волн равномерно и прямолинейно движущейся заряженной частицей при пересечении ею границы раздела двух сред с разными показателями преломления. При переходе частицы из одной среды в другую изменяются характеристики связанного с ней электромагнитного поля, что сопровождается излучением электромагнитных волн. В направлении, обратном движению частицы, излучаются электромагнитные волны видимого диапазона (примерно один фотон при пересечении границы сотней частиц). Переходное излучение, испускаемое частицей в направлении ее движения, занимает очень широкую спектральную область, но максимальная частота излучения пропорциональна энергии частицы. Например, электрон с энергией 10 ГэВ при пересечении границы плотной среды и газа излучает фотон с энергией ~ 10 кэВ.

Эта зависимость и положена в основу спектрометрии γ -излучения, порождающего при взаимодействии со средой быстрые электроны, которые, в свою очередь, испускают переходное излучение. В счетчиках,

действие которых основано на переходном излучении, электроны пересекают около 1000 слоев вещества, разделенных газовыми промежутками, и суммарное переходное излучение регистрируется фотоэлектронным умножителем.

Принцип спектрометрии по энергии квантов характеристического рентгеновского излучения и γ -излучения полупроводниковыми детекторами аналогичен механизму спектрометрии быстрых частиц (корпускулярного излучения), который рассматривается в подразд. 2.3.3.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Опишите принципы регистрации и усиления СВЧ излучения с применением лампы бегущей волны.
2. Приведите классификацию приемников оптического излучения.
3. Опишите принципы действия вакуумных приемников оптического излучения: фотоэлементов; диодных и канальных фотоэлектронных умножителей; электронно-оптических преобразователей.
4. Поясните принципы действия полупроводниковых приемников оптического излучения: фоторезисторов; фотодиодов; ПЗС-матриц.
5. Опишите принцип действия пикселя ПЗС-матрицы.
6. Перечислите характеристики приемников оптического излучения. Уясните смысл каждой из характеристик.
7. На каких физических явлениях основан процесс разложения оптического излучения в спектр?
8. Каков физический смысл дисперсии света? Сравните дисперсию оптического излучения в среде с дисперсией электромагнитных волн (см. п. 2.2.2.1).
9. Поясните сущность дифракции света. Выведите условие получения главных максимумов при дифракции на дифракционной решетке. Какие физические процессы лежат в основе получения дифракционных спектров?
10. Сопоставьте формы оптических спектров, получаемых с применением дисперсионной призмы и дифракционной решетки. Опишите различия, имеющиеся в дисперсионном и дифракционном спектрах.
11. Поясните принцип фокусировки электромагнитного излучения с применением геометрического расположения элементов, соответствующего окружности Роуланда.
12. Уясните смысл основных характеристик рабочих элементов оптических спектральных приборов – угловой дисперсии и разрешающей способности.
13. Приведите вывод соотношений для расчета угловой дисперсии и разрешающей способности дифракционной решетки.

14. Опишите методы, лежащие в основе регистрации рентгеновского и γ -излучений.
15. Охарактеризуйте методы, лежащие в основе спектрометрии рентгеновского излучения по длинам волн. Метод спектрометрии, основанный на дифракции, сравните с методом монохроматизации рентгеновского излучения на изогнутом монокристалле.
16. Опишите методы, лежащие в основе спектрометрии γ -излучения.

2.3. Принципы преобразований корпускулярного излучения

2.3.1. Природа и основные характеристики корпускулярного излучения

Корпускулярное излучение представляет собой направленные потоки частиц молекулярного, атомного и субатомного масштаба (молекул, атомов, ионов, ядер, нейтронов, электронов), поперечные размеры которых обычно значительно меньше их длины.

Корпускулярное излучение, так же как и электромагнитное, проявляет волновые свойства; оно характеризуется длиной волны де Бройля $\lambda = h / p$, где h – постоянная Планка, p – импульс частицы. Импульс нерелятивистской частицы

$$p = \sqrt{2mE_k},$$

релятивистской –

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k (E_k + 2E_0)},$$

где m – масса частицы; E_k – ее кинетическая энергия; c – скорость света в вакууме; E_0 – энергия покоя частицы. Соответственно, длина волны де Бройля определяется по следующим формулам:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}; \quad \lambda = \frac{hc}{\sqrt{E_k (E_k + 2E_0)}}. \quad (2.30)$$

В методах измерений состава веществ наиболее широкое применение находят пучки электронов, а также ионов (чаще всего ионизированных атомов); в ряде методов используются ядра атомов и нейтроны.

Основными характеристиками самих частиц являются масса и электрический заряд. Наличие электрического заряда у электронов, ионов и ядер позволяет эффективно управлять движением этих частиц в условиях высокого вакуума с применением электрического и магнитного полей, формировать потоки частиц и управлять ими.

Сформированные в специальных ускорителях потоки частиц (электронные и ионные пучки) характеризуются энергией, плотностью тока, площадью поперечного сечения, неоднородностью по сечению, угловым и энергетическим разбросом и другими параметрами.

Параметры электронного или ионного пучка в различных его сечениях можно определить с применением теоремы Лиувилля, утверждающей, что фазовый объем механической системы, состоящей из большого числа частиц, остается постоянным при движении этой системы. Движение каждой частицы представляется точкой в шестимерном фазовом пространстве координат и импульсов. В качестве канонических переменных, определяющих положение этой точки, выбираются декартовы координаты частицы x , y и z и проекции ее импульса p_x , p_y и p_z . В соответствии с теоремой Лиувилля, интеграл по всему фазовому объему, заполненному представляющими точками, остается постоянным:

$$\int dx \, dy \, dz \, dp_x \, dp_y \, dp_z = \text{const} . \quad (2.31)$$

Теорема Лиувилля позволяет определить параметры пучка корпускулярного излучения в различных его частях, если достаточно полно известны его параметры в какой-либо одной части, например вблизи источника. При рассмотрении свойств пучка без учета его рассеяния на остаточном газе принимается во внимание постепенное увеличение радиуса его сечения, обусловленное наличием у частиц поперечных тепловых скоростей и взаимным отталкиванием заряженных частиц (объемным зарядом пучка).

В применении к пучку, распространяющемуся в направлении x , величина, аналогичная интегралу (2.31) в фазовом пространстве координат и импульсов, называется эмиттансом пучка. Эмиттанс определяется интегралом

$$\ell = \int dr dr', \text{ или } \ell = rr', \quad (2.32)$$

где r – радиальная координата каждой из частиц пучка в любом его сечении; r' – производная от радиальной координаты частицы в пучке по x или тангенс угла наклона α траектории частицы по отношению к направлению распространения пучка x . С другой стороны,

$$r' = \text{tg} \alpha = \frac{v_r}{v_x}, \quad (2.33)$$

где v_r – радиальная (поперечная) составляющая скорости частицы; v_x – продольная составляющая скорости. В силу малости угла α $\text{tg} \alpha \approx \alpha$. Единица измерения $[\ell] = \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

Из (2.33) следует, что эмиттанс при заданном значении поперечной скорости зависит от продольной скорости частиц в пучке, а следовательно, от энергии и импульса частиц. Для того чтобы охарактеризовать параметры пучка независимо от энергии его частиц, которая может изменяться при прохождении ускоряющих систем, вводится понятие приведенного эмиттанса:

$$\ell^0 = \ell \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (2.34)$$

где $\beta = v_x / c$; c – скорость света в вакууме. В нерелятивистском случае

$$\ell^0 = \ell \beta = r \frac{v_r}{v_x} \frac{v_x}{c} = \frac{v_r}{c} r. \quad (2.35)$$

В соответствии с теоремой Лиувилля, эмиттанс пучка, включающий характеристики сечения пучка и его расходимости, должен оставаться постоянным. В частности, если рассмотреть два произвольных сечения пучка, то для импульсов частиц в этих сечениях в направлении, поперечном распространению пучка ($p_1 = m v_{r_1}$ и $p_2 = m v_{r_2}$), из (2.35) имеем:

$$m v_{r_1} r_1 = m v_{r_2} r_2; \quad p_1 r_1 = p_2 r_2, \text{ или } \frac{p_1}{p_2} = \frac{r_2}{r_1}.$$

Это означает, что сжатие пучка (при фокусировке) приводит к увеличению разброса частиц по импульсам, а расширение – к уменьшению разброса.

Таким образом, эмиттанс характеризует основные параметры пучка частиц. Чем меньше эмиттанс, тем меньше могут быть размеры вакуумных каналов в направлении дальнейшего движения пучка. Параметры трубопроводов, линз и других элементов ускорителя, пропускающих первичный пучок частиц и захватывающих их в режим ускорения, оцениваются величиной, аналогичной эмиттансу, измеряемой в тех же единицах и называемой акцептансом. Для обеспечения возможности дальнейшего ускорения пучка корпускулярного излучения необходимо, чтобы акцептанс был больше эмиттанса пучка.

Характеристикой интенсивности радиальных сил расталкивания частиц под воздействием пространственного разряда в пучке электронов является первеанс, значение которого равно отношению силы тока электронного потока к ускоряющему напряжению в степени три вторых. Электронные потоки с первеансом порядка 10^{-6} А/В^{3/2} относят к высокопервеансным (высокоинтенсивным); при их описании необходимо учитывать эффекты расширения пучка за счет действия пространственного заряда. Электронные потоки с пренебрежимо малой величиной пространственного заряда характеризуются значениями первеанса меньше 10^{-8} А/В^{3/2}.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Приведите определение понятия «корпускулярное излучение».
2. Перечислите характеристики корпускулярного излучения как потока частиц. Уясните смысл каждой из характеристик.

2.3.2. Получение и формирование потоков корпускулярного излучения

Источники корпускулярного излучения. Для создания направленных потоков электронов или ионов необходимо непрерывно получать эти частицы в достаточном количестве, вводить их в вакуум, формировать узкий направленный пучок и задавать ему определенную энергию (монохроматизировать), управлять движением частиц в пучке, изменяя при необходимости их энергию и направление движения (ускорять либо замедлять, отклонять, разворачивать и т. д.). Принцип действия электронных источников основан на явлении электронной эмиссии. Ионы получают путем ионизации атомов и молекул в газовом разряде. В основе принципов монохроматизации корпускулярного излучения и управления им лежит действие на заряженные частицы электрического и магнитного полей.

Основным способом введения электронов в вакуум является электронная эмиссия – явление испускания электронов поверхностью твердых тел, в частности металлов, в вакуум.

Электроны проводимости металла удерживаются внутри кристаллической решетки силами кулоновского притяжения между электронами и положительными ионами, расположенными в узлах решетки. Для того чтобы преодолеть действие этих сил и перевести электрон проводимости из металла в вакуум, необходимо сообщить электрону дополнительную энергию, называемую работой выхода электрона. Электронная теория твердых тел рассматривает работу выхода электрона из металла как разность между минимальной энергией электрона в вакууме и энергией (уровнем) Ферми. Значение работы выхода зависит от природы металла и по порядку величины составляет несколько электронвольт. При сообщении электронам энергии, превышающей работу выхода, часть их эмиттирует из металла в вакуум. Для последующего ускорения электронов на эмиттирующий электрод подают отрицательный электрический потенциал, и такой электрод называют катодом. На практике используются композиционные катоды сложного состава, характеризующиеся малыми значениями работы выхода, а также высокими значениями эмиссионной способности и экономичности. Под эмиссионной способностью катода понимают плотность тока эмиссии, под экономичностью – от-

ношение силы тока электронов к мощности, затраченной на возбуждение эмиссии.

В зависимости от способа сообщения энергии электронам вещества различают несколько видов электронной эмиссии. Если электроны получают энергию при нагревании, то имеет место термоэлектронная эмиссия. Под действием потока электромагнитного излучения (в частности, света) возбуждается фотоэлектронная эмиссия (внешний фотоэффект). Если энергия сообщается электронам при бомбардировке извне какими-либо другими частицами (электронами, ионами), то имеет место вторичная электронная эмиссия. Явление фотоэлектронной эмиссии положено также в основу принципа действия фотоэлектрических приемников электромагнитного излучения, а совместно с вторичной электронной эмиссией – фотоэлектронных умножителей (см. подразд. 2.2.3). В очень сильных электрических полях (при напряженности поля $\sim 10^7$ – 10^8 В/м) наблюдается автоэлектронная (полевая) эмиссия. Если электрод имеет малый радиус (т. е. представляет собой острие), то силовые линии электрического поля сильно сгущаются, и напряженность поля у поверхности такого катода становится очень большой даже при не очень высоком напряжении между катодом и анодом. В этом случае электроны испускаются даже из ненагретого катода, поэтому автоэлектронную эмиссию называют холодной. Автоэмиссионные катоды изготавливаются в виде игольчатых, лезвийных или нитевидных эмиттеров. Автоэлектронная эмиссия при высокой концентрации энергии в микрообъемах катода вблизи образующихся на его поверхности микроострий может возбуждать взрывную электронную эмиссию, при которой ток электронов на порядки превосходит начальный ток. Ток взрывной электронной эмиссии состоит из отдельных порций электронов (примерно по 10^{11} – 10^{12} электронов), имеющих характер электронных лавин – эктонов. Время образования лавин составляет 10^{-9} – 10^{-8} с. Нестационарное испускание электронов твердым телом, предварительно переведенным в возбужденное состояние посредством радиационного, механического или химического воздействий, называется экзоэлектронной эмиссией.

Наиболее эффективным способом получения ионов для введения их в вакуум является ионизация молекул в газовых разрядах. Газовым разрядом, или электрическим разрядом в газе, называют прохождение электрического тока через газовый промежуток при приложении разности потенциалов между электродами, размещенными в сосуде с газом. Вызвать электропроводность газа можно путем ионизации его молекул под воздействием нагревания, электромагнитного, в частности ультрафиолетового, либо радиоактивного излучения. Энергия ионизирующего

воздействия должна превышать энергию ионизации, значение которой зависит от природы молекулы. При ионизации от электрически нейтральной молекулы газа отрывается один или несколько электронов; в результате возникают положительно заряженный ион и электроны. При взаимодействии электронов с нейтральными атомами или молекулами могут образовываться отрицательные ионы.

Газовый разряд, который существует только при действии внешнего ионизатора, называется несамостоятельным. При повышении напряжения между электродами за счет ударной ионизации и других процессов в газе дополнительно образуются носители заряда и несамостоятельный разряд переходит в самостоятельный, который продолжается и в отсутствие действия внешнего ионизатора. Напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд, называется напряжением пробоя газового промежутка или напряжением зажигания газового разряда. Напряжение пробоя $U_{пр}$ зависит от природы газа, давления и расстояния между электродами.

В явлениях электрического разряда в газах важную роль играет ионизация молекул газа электронными ударами (ударная ионизация). Движущийся электрон, обладая достаточной кинетической энергией, при соударении с нейтральной молекулой выбивает из нее электроны. В ионизации молекул газа участвуют как электроны, выбитые из других молекул при их ионизации, так и электроны, поступающие из электродов вследствие электронной эмиссии. Первичная ионизация разреженных газов осуществляется обычно бомбардировкой молекул газа ускоренными электронами, эмиттировавшими из катода. Электропроводность газового промежутка при самостоятельном разряде зависит от давления. В области низкого вакуума электроны, появляющиеся в результате внешних воздействий, вследствие малой длины свободного пробега не успевают приобрести под воздействием электрического поля энергию, необходимую для ионизации молекул газа, и электропроводность газа невелика. В области высокого вакуума вследствие малой концентрации заряженных частиц электропроводность газового промежутка еще меньше. В области давлений, соответствующей среднему вакууму, условия ионизации молекул газа наиболее эффективны. При более высоких давлениях для ионизации газа требуется высокая напряженность электрического поля, ускоряющего электроны; при более низких давлениях длина свободного пробега электронов существенно превышает размер вакуумной камеры и вероятность ионизации снижается. Первичные электроны ионизируют молекулы остаточного газа, а образующиеся вторичные электроны поддерживают самостоятельный разряд.

Для характеристики процесса ионизации разреженных газов электронными ударами вводится физическая величина, называемая эффективностью ионизации молекул, которая определяет число пар положительных и отрицательных ионов, образованных одним электроном на пути в 1 м при давлении 1 Па. На рис. 2.27 приведена зависимость эффективности ионизации η молекул различных газов от энергии eU электронов (e – заряд электрона; U – ускоряющее напряжение).

Она имеет характерный максимум, соответствующий энергиям электронов, лежащих в интервале 100–150 эВ. Молекулы с большей молекулярной массой характеризуются более высокими значениями эффективности ионизации.

Концентрации положительных n_+ и отрицательных n_- ионов в ионизированном газе могут быть не равны друг другу. Поэтому в газовом разряде при наличии тока появляются объемные заряды, которые обуславливают сложное распределение электрического поля между электродами. Кроме того, в отличие от металлов, концентрации носителей заряда в ионизированном газе не постоянны: электроны и ионы могут возникать в процессе разряда, в частности в результате ионизации электронными ударами. Поэтому концентрации носителей тока (ионов обоих знаков и электронов), а следовательно, и значение удельной электропроводности газа зависят от напряженности поля, и для тока в газах в общем случае не выполняется закон Ома, устанавливающий прямую пропорциональность между плотностью тока j и напряженностью E электрического поля: $j = \sigma_e E$, где σ_e – удельная электропроводность.

В зависимости от того, какие именно процессы образования газовых ионов в разряде играют главную роль, возможны коронный, искровой, дуговой, тлеющий и другие разряды. Эти формы разряда отличаются друг от друга свойствами, внешним видом и областями давлений газа, при которых они осуществляются.

Наиболее эффективна ионизация молекул в самостоятельном тлеющем газовом разряде, протекающем в интервале давлений, соответствующем среднему вакууму. Тлеющий разряд может возбуждаться как постоянным, так и переменным, в том числе высокочастотным, электрическим

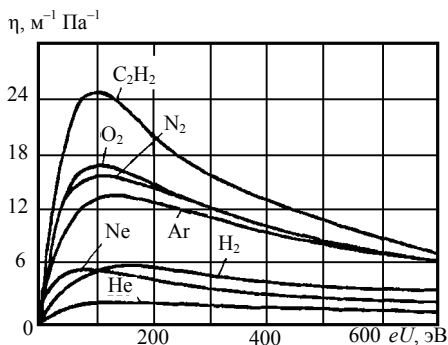


Рис. 2.27. Зависимость эффективности ионизации молекул газов электронными ударами от энергии электронов

полем. Высокочастотный газовый разряд отличается от газового разряда постоянного тока, прежде всего, меньшей ролью процессов, происходящих в приэлектродных областях. Поэтому в высокочастотном электрическом, а также магнитном поле возможен вообще безэлектродный газовый разряд. В первом случае разрядный ток является током смещения, во втором – индукционным током.

В газовом разряде наряду с ионизацией молекул происходит их диссоциация на атомы и возбуждение. Возбужденные молекулы и атомы переходят в менее возбужденные состояния. При таких переходах испускается электромагнитное излучение оптического диапазона, в том числе видимый свет. Эти процессы лежат в основе принципов действия газоразрядных источников электромагнитного излучения (см. п. 2.2.2.2).

Основную функцию поставки заряженных частиц в ионных источниках чаще всего выполняет тлеющий газовый разряд, а в электронных источниках – эмиссионный катод. Ионы вытягиваются электрическим полем из разрядного промежутка, а электроны – из электронного облака, образующегося вблизи катода; затем формируется пучок заряженных частиц.

Формирование потоков корпускулярного излучения. Раздел науки и техники, посвященный изучению формирования электронных и ионных пучков в вакууме и управления ими с помощью электрического и магнитного полей, получил название электронной и ионной оптики. В зависимости от подхода при рассмотрении пучков заряженных частиц различают: геометрическую электронную и ионную оптику; волновую электронную и ионную оптику; электронную и ионную оптику пучков с большой плотностью пространственного заряда. В геометрической электронной и ионной оптике изучается формирование пучков заряженных частиц под действием внешних полей. Поле, которое создается самими заряженными частицами, при этом не учитывается. Электроны и ионы рассматриваются как точечные заряды или материальные точки, обладающие электрическим зарядом, движение которых описывается уравнениями классической механики. В волновой электронной и ионной оптике учитываются волновые свойства движущихся заряженных частиц. При описании их движения используются уравнение Шрёдингера и длина волны де Бройля. Волновой оптикой описывается, например, дифракция заряженных частиц, в частности дифракция электронов в электронном микроскопе. В электронной и ионной оптике пучков с большой плотностью пространственного заряда наряду с внешними полями учитываются поля, создаваемые самими заряженными частицами, но не учитываются волновые свойства частиц. В частности, учитываются силы взаимного отталкивания между одноименно заряжен-

ными частицами в пучке (объемный заряд), вызывающие его расширение (см. подразд. 2.3.1).

Рассмотрим движение заряженных частиц в однородных электрическом и магнитном полях.

Сила, действующая на заряженную частицу со стороны электрического и магнитного полей (сила Лоренца),

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}], \quad (2.36)$$

где q – заряд частицы; \mathbf{E} – напряженность электрического поля; \mathbf{v} – скорость движения частицы; \mathbf{B} – вектор индукции магнитного поля.

Со стороны электрического поля действует сила

$$\mathbf{F}_e = q\mathbf{E}, \quad (2.37)$$

которая направлена по вектору напряженности \mathbf{E} в случае положительного заряда ($q > 0$) и против вектора \mathbf{E} в случае отрицательного заряда ($q < 0$) частицы. Под действием этой силы частица приобретает ускорение

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}_e}{m} = \frac{q}{m} \mathbf{E}, \quad (2.38)$$

где m – масса частицы. Ускорение и, следовательно, характер движения частицы в электрическом поле зависят от величины q/m – удельного заряда частицы.

Под действием электрического поля частица приобретает кинетическую энергию E_k , равную работе A сил электрического поля по перемещению заряда q :

$$E_k = A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU, \quad (2.39)$$

где φ_1 и φ_2 – потенциалы электрического поля в исходной и конечной точках, между которыми перемещается заряд; U – электрическое напряжение между этими точками. При ускорении заряженной частицы электрическим полем величину U называют ускоряющим напряжением или ускоряющей разностью потенциалов. Энергия, приобретаемая заряженной частицей, несущей один элементарный заряд ($q = e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл), при ускорении электрическим напряжением в 1 В, принята за внесистемную единицу измерения энергии – электрон-вольт (эВ) ($1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

Если заряженная частица влетает в электрическое поле с начальной скоростью \mathbf{v}_0 , направленной параллельно силовым линиям, то в зависимости от знака заряда частицы и соотношения между направлениями векторов \mathbf{v}_0 и \mathbf{E} она будет либо ускоряться, либо замедляться электрическим полем. В случае произвольного направления вектора начальной скорости \mathbf{v}_0 по отношению к линиям напряженности поля частица

получит ускорение (см. (2.38)), направленное под углом к скорости, вследствие чего траектория частицы будет искривляться.

Из (2.39) следует, что энергия заряженной частицы при ее ускорении электрическим полем из состояния с пренебрежимо малой начальной скоростью определяется ускоряющим напряжением и зарядом частицы. Электроны, а также все ионы, имеющие заряд одной и той же кратности, приобретают под действием определенного ускоряющего напряжения одинаковую энергию. Иными словами, формируется моноэнергетическое (монохроматическое) корпускулярное излучение. Если же в числе ускоряемых будут ионы одинаковых масс, но с различной кратностью заряда, то излучение не будет монохроматическим. В таких случаях, а также тогда, когда из ионного источника поступают ионизированные молекулы различных масс, для получения монохроматического ионного пучка необходимо вначале ускорить ионы до небольшой энергии и направить их в область действия магнитного поля. Под действием магнитного поля траектория частиц искривляется, причем кривизна траектории зависит от удельного заряда частицы, что и позволяет осуществить разделение ионов по удельным зарядам или по массам (так называемую масс-сепарацию). Таким образом из потока выделяются ионы с одинаковыми удельными зарядами, и при последующем ускорении электрическим полем формируется моноэнергетический ионный пучок.

На заряженную частицу, движущуюся со скоростью \mathbf{v} в магнитном поле, действует сила, определяемая соотношением

$$\mathbf{F}_m = q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}], \quad (2.40)$$

где \mathbf{B} – вектор индукции магнитного поля. Направление силы \mathbf{F}_m определяется в соответствии с (2.40) векторным произведением скорости \mathbf{v} на индукцию магнитного поля \mathbf{B} с учетом знака заряда q частицы. Сила \mathbf{F}_m всегда перпендикулярна к скорости движения частицы и линиям магнитной индукции. Это означает, что работа силы \mathbf{F}_m всегда равна нулю; следовательно, при движении в магнитном поле величина (модуль) скорости частицы и ее кинетическая энергия остаются неизменными.

В случае когда частица влетает в однородное магнитное поле со скоростью, направленной вдоль линий индукции магнитного поля, $\mathbf{F}_m = 0$ и частица продолжает двигаться в том же направлении без изменения вектора скорости.

Если же заряженная частица влетает в однородное магнитное поле со скоростью, направленной перпендикулярно линиям индукции, она под действием силы \mathbf{F}_m будет двигаться по дуге или по окружности. Сила \mathbf{F}_m является при этом центростремительной силой, удерживающей частицу на круговой траектории и сообщаящей ей нормальное ускорение:

$$qvB = m \frac{v^2}{r}, \quad (2.41)$$

где r – радиус кривизны траектории. Из (2.41) получим выражение для радиуса траектории частицы:

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{v}{(q/m)B}. \quad (2.42)$$

Если частица до попадания в магнитное поле ускоряется электрическим полем, то

$$r = \sqrt{\frac{2}{q/m} \frac{\sqrt{U}}{B}}. \quad (2.43)$$

Период обращения заряженной частицы в магнитном поле

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{(q/m)B}. \quad (2.44)$$

Частота обращения

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \frac{q}{m} B. \quad (2.45)$$

Из соотношений (2.42)–(2.45) следует, что радиус траектории заряженной частицы, период и частота ее обращения зависят от удельного заряда q/m частицы, т. е. от ее природы. Радиус траектории заряженной частицы в однородном магнитном поле зависит от скорости v частицы или от ее импульса mv . Период и частота обращения не зависят от скорости частицы и энергии ее движения.

Частота обращения заряженных частиц в однородном магнитном поле в плоскости, перпендикулярной силовым линиям поля, называется циклотронной частотой. Соотношением (2.45) определяется циклотронная частота свободной частицы.

Если вектор начальной скорости \mathbf{v}_0 частицы составляет некоторый угол α с направлением индукции однородного магнитного поля, то скорость \mathbf{v}_0 удобно разложить на две составляющие, одна из которых (\mathbf{v}_t) параллельна индукции \mathbf{B} , а другая (\mathbf{v}_n) перпендикулярна вектору \mathbf{B} . На частицу будет действовать сила \mathbf{F}_m , обусловленная лишь составляющей \mathbf{v}_n . Модуль этой силы

$$F_m = qv_n B = qv_0 \sin \alpha \cdot B. \quad (2.46)$$

При этом частица будет двигаться по окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной вектору \mathbf{B} . Составляющая \mathbf{v}_t не вызывает появления дополнительной силы. Поэтому в направлении линий индукции

частица будет двигаться по инерции равномерно со скоростью v_t . В результате сложения обоих движений частица будет двигаться по траектории в виде цилиндрической винтовой спирали. Радиус этой спирали

$$r = \frac{v_0 \sin \alpha}{(q/m)B}, \quad (2.47)$$

а шаг ее витка

$$h = v_t T = v_0 \cos \alpha \cdot T = \frac{2\pi v_0 \cos \alpha}{(q/m)B}. \quad (2.48)$$

Для формирования пучка потоку заряженных частиц (электронов или ионов), получаемых в электронном или ионном источнике, придается необходимая конфигурация с помощью электрического или (и) магнитного полей. Осуществляются также управление движением заряженных частиц по заданной траектории и фокусировка потока частиц.

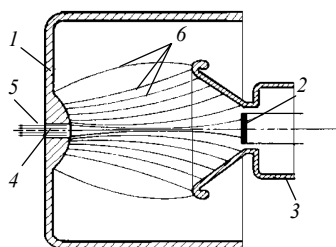


Рис. 2.28. Схема электронной пушки:

- 1 – анод; 2 – катод;
3 – катодная линза; 4 – отверстие отбора электронов; 5 – пучок электронов; 6 – силовые линии электрического поля

Рассмотрим принцип формирования пучка заряженных частиц на примере источника электронов – так называемой электронной пушки (рис. 2.28). Основным элементом пушки является катод 2, активная поверхность которого испускает электроны вследствие термоэлектронной эмиссии. Катод размещен внутри конического электрода катодной линзы 3. Катод и катодная линза находятся под одинаковым отрицательным потенциалом. Анод 1 выполнен в виде цилиндра, в основании которого имеется отверстие 4 для отбора пучка электронов. Внутренняя поверхность основания

анода и внутренняя поверхность катодной линзы образуют электронно-оптическую систему. Электрическое поле между анодом и катодом, силовые линии которого направлены от анода к катодной линзе, ускоряет электроны, формирует пучок 5 электронов и направляет его в отверстие отбора и далее, при необходимости дальнейшего ускорения, в ускорительную систему. За счет соответствующей конфигурации силовых линий 6 электрического поля осуществляется фокусировка электронов, движущихся с активной поверхности катода к аноду. В пространстве между анодом и катодом может устанавливаться дополнительный (фокусирующий) электрод, изменение потенциала которого дает возможность регулировать энергию электронов и условия их фокусировки.

Сечение с минимальным радиусом пучка и нулевыми радиальными составляющими скоростей электронов называется кроссовером. Отношение плотности тока в кроссовере к плотности тока эмиссии из катода является одной из основных характеристик электронной пушки и называется компрессией. В сечениях пучка, следующих за кроссовером, происходит расширение электронного пучка вследствие взаимного отталкивания частиц. Обычно анод электронной пушки заземляется, а катодный блок находится под отрицательным потенциалом, соответствующим ускоряющему напряжению. Для формирования пучка электронов с помощью электронно-оптической системы необходимо, чтобы скорость направленного движения частиц под действием ускоряющего напряжения во много раз превышала скорость их хаотического теплового движения. Кроме того, напряжение между катодом и анодом должно обеспечить достаточную силу электронного тока.

Как указывалось выше, наиболее широко распространены ионные источники, в которых ионизация атомов или молекул рабочего вещества осуществляется в плазме тлеющего газового разряда. В качестве примера рассмотрим схему высокочастотного ионного источника.

Ионный источник (рис. 2.29) состоит из камеры ионизации, отверстия отбора ионов, систем вытягивания и фокусировки ионов. Разрядная камера заполняется рабочим газом. В случае если рабочее вещество, молекулы которого требуется ионизировать, не является газообразным, его предварительно переводят в газообразное состояние, например путем испарения. Высокочастотное магнитное поле, создаваемое катушкой 4, питаемой от высокочастотного генератора, зажигает в разрядной камере безэлектродный тлеющий разряд 3, вызывающий ионизацию рабочего газа. Разрядная камера представляет собой цилиндрическую колбу

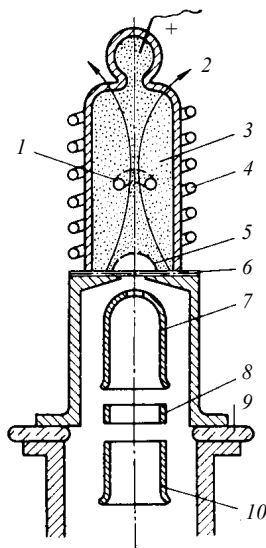


Рис. 2.29. Схема высокочастотного ионного источника:

- 1 – высокочастотный кольцевой разряд;
- 2 – силловые линии высокочастотного магнитного поля; 3 – разрядная плазма;
- 4 – катушка; 5 – граница плазмы;
- 6 – манжета из слюды;
- 7 – вытягивающий электрод;
- 8 – фокусирующий электрод;
- 9 – изолятор;
- 10 – ускоряющий электрод

из кварца или пирекса. В верхнюю часть колбы впаян анод. Положительный потенциал, подаваемый на анод, улучшает условия вытягивания ионов из разрядной камеры через отверстие отбора. Разность потенциалов, прикладываемая между плазмой и вытягивающим электродом (катодом) 7, вытягивает положительно заряженные ионы из плазмы. Поверхностный слой 5 плазмы, заряжаемый отрицательно вследствие ухода ионов, отталкивается от катода. При этом поверхность экстракции ионов увеличивается, принимая вогнутую форму. Для увеличения поверхности экстракции устанавливаются также специальные изоляционные манжеты 6, удаляющие плазму от края рабочего отверстия. Вогнутая форма границы плазмы способствует также первичной фокусировке ионного пучка. Ионный пучок, прошедший через вытягивающий электрод 7, фокусируется в электростатическом поле электрода 8 и ускоряется электродом 10. Вытягивающий 7 и фокусирующий 8 электроды ионного источника образуют электростатическую линзу, которая предназначена для формирования узкого сфокусированного ионного пучка.

Сформированный на выходе из источника пучок корпускулярного излучения подвергается дальнейшему ускорению электрическим полем в ускорительной системе для придания ему необходимой энергии. В аналитических приборах, как правило, используются линейные ускорители. При этом вновь возникает необходимость фокусировки пучка заряженных частиц, расходящегося под действием пространственного заряда самого пучка вследствие кулоновского отталкивания одноименно заряженных частиц.

Для фокусировки корпускулярного излучения применяются электронные и ионные линзы, в основу принципа действия которых положено движение заряженных частиц в электрическом или магнитном полях. Соответственно этому линзы называются электростатическими или магнитными.

Электростатические линзы в зависимости от геометрии используемых полей подразделяются на осесимметричные, цилиндрические, трансаксиальные и квадрупольные.

Простейшей осесимметричной электростатической линзой является диафрагма с круглым отверстием, находящаяся под электрическим потенциалом и граничащая с одной или двух сторон с однородными электрическими полями. В зависимости от распределения потенциала полей она может действовать как собирающая или как рассеивающая линза.

Осесимметричная электростатическая линза, к которой с обеих сторон примыкают электростатические поля с постоянными, но разными потенциалами φ_1 и φ_2 , называется иммерсионной. Она может состоять из двух диафрагм или двух цилиндров, находящихся под потен-

циалами φ_1 и φ_2 . Схема фокусировки электронного пучка в осесимметричной иммерсионной электростатической линзе, состоящей из двух цилиндрических электродов, которые расположены на одной оси и на которые подаются элек-

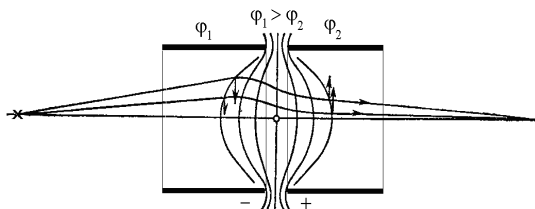


Рис. 2.30. Схема фокусирующего действия электростатической иммерсионной электронной линзы

трические потенциалы φ_1 и φ_2 , иллюстрируется рис. 2.30. Расходящийся пучок частиц, попадая в пространство между цилиндрами (область электрического поля, изображенного на рисунке эквипотенциальными поверхностями), под действием поля ускоряется в направлении движения, фокусируется при прохождении первого участка пути между цилиндрами и дефокусируется при прохождении второго участка. Поскольку время прохождения ускоряющейся частицей первого отрезка пути больше, чем второго отрезка, расположенного справа, то преобладает процесс фокусировки.

Линза, которая граничит с полями, имеющими одинаковые потенциалы, называется однопотенциальной. Такая линза состоит из трех и более электродов (рис. 2.31). При прохождении заряженных частиц через иммерсионную линзу их скорости изменяются по модулю, а при

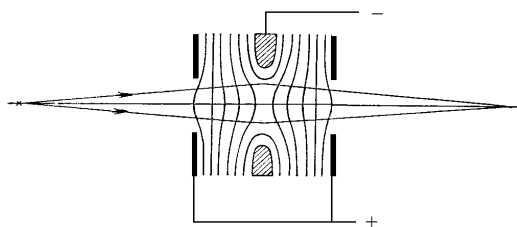


Рис. 2.31. Схема однопотенциальной электростатической электронной линзы

прохождении через одноночную линзу остаются неизменными.

Электроды цилиндрических электростатических линз служат диафрагмы с узкой щелью или две пары пластин, расположенных симметрично относительно средней плоскости линз. Трансакси-

альные электростатические линзы имеют электроды в виде двух коаксиальных цилиндров с кольцевыми щелями для пропускания пучка частиц в направлении, перпендикулярном оси цилиндров.

Магнитная линза, фокусирующая расходящийся пучок частиц в осевом направлении, представляет собой цилиндрически симметричный электромагнит с очень острыми кольцевыми наконечниками полюсов. Между полюсами создается сильное неоднородное магнитное поле,

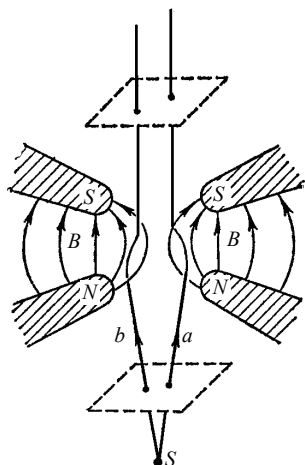


Рис. 2.32. Схема фокусирующего действия магнитной линзы

которое фокусирует заряженные частицы, движущиеся через область магнитного поля. Механизм фокусировки рассмотрим на примере движения электронов из точечного источника S (рис. 2.32). Как только электрон, движущийся по траектории a , достигнет области магнитного поля, горизонтальная составляющая поля отклонит его в направлении «от нас». Электрон приобретет боковую составляющую скорости и при движении через сильное вертикальное поле получит импульс в направлении к оси линзы. При вылете из области магнитного поля электрон получит импульс в направлении «к нам», который скомпенсирует импульс, полученный при входе в область магнитного поля. Результирующим действием магнитного поля линзы будет

отклонение электрона к оси. На электрон, движущийся по траектории b , действуют такие же силы, но в противоположных направлениях, поэтому он также отклонится по направлению к оси линзы. Если источник электронов S расположен в фокусе линзы, то после линзы сформируется параллельный пучок электронов.

Квадрупольные электростатические и магнитные линзы создают поля, имеющие две плоскости симметрии, силовые линии которых в области движения заряженных частиц почти перпендикулярны их скоростям. Квадрупольная линза фокусирует поток частиц в одном направлении и дефокусирует его в другом. Рассмотрим принцип действия магнитной квадрупольной линзы (рис. 2.33).

Положительно заряженная частица, которая входит в линзу в направлении «от нас» ниже или выше центра, под действием силы Лоренца вытягивается в центр, а при вхождении справа или слева от центра выталкивается из линзы (рис. 2.33, a). Такая линза фокусирует заряженные частицы в вертикальном направлении; в результате образуется ленточный пучок, расположенный горизонтально. При переключении всех полюсов электромагнита на противоположные (рис. 2.33, b) направления сил, действующих на частицу, изменяются на обратные, получается фокусировка в горизонтальном направлении. Величина индукции поля, а следовательно, и фокусирующая сила у таких линз линейно возрастают с удалением от оси линзы. Под действием двух квадрупольных линз, расположенных последовательно, корпускулярное излучение фокусируется в узкий пучок.

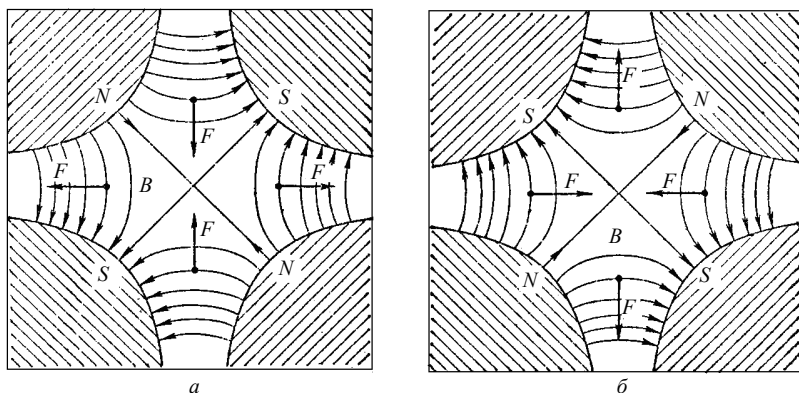


Рис. 2.33. Схемы квадрупольных магнитных линз, фокусирующих пучок заряженных частиц:

a – в вертикальном направлении; *б* – в горизонтальном направлении

Пучок корпускулярного излучения может быть сфокусирован и при прохождении через область магнитного поля, создаваемого током в обмотке катушки-соленоида вдоль ее оси (рис. 2.34). Положительно заряженный ион, попадая в соленоид сверху (в точке *a*), под действием радиальной составляющей индукции магнитного поля (см. формулу (2.40)) начинает отклоняться в поперечном направлении. За счет наличия поперечной скорости под действием осевой составляющей индукции поля частица отклоняется к оси соленоида. В средней части соленоида частица будет двигаться по конической спирали и при выходе из соленоида (в точке *b*) – ближе к его оси.

Для управления потоками заряженных частиц наряду с линзами применяются электростатические и магнитные зеркала и призмы, принцип действия которых также основан на отклонении заряженных частиц электрическим и магнитным полями.

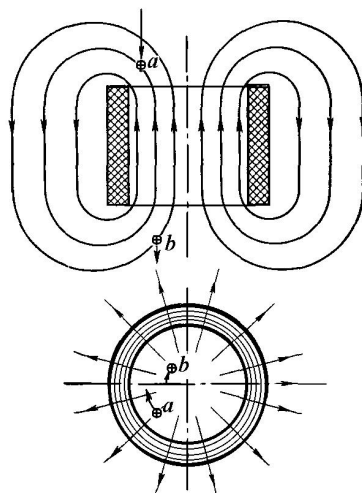


Рис. 2.34. Схема фокусировки пучка при прохождении положительно заряженных ионов вдоль оси соленоида

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Перечислите и охарактеризуйте виды электронной эмиссии. Каков смысл величины, называемой работой выхода электрона? От чего зависит значение работы выхода?
2. Что понимают под газовым разрядом? Каков механизм перехода от не-самостоятельного газового разряда к самостоятельному?
3. Поясните основной механизм ионизации молекул газа в самостоятельном газовом разряде? Что понимают под эффективностью ионизации молекул? От каких параметров зависит эффективность ионизации?
4. Охарактеризуйте движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях.
5. Поясните принцип действия электронной пушки; ионного источника.
6. Объясните принцип фокусировки корпускулярного излучения электростатическими линзами; магнитными линзами.

2.3.3. Регистрация и спектрометрия корпускулярного излучения

Регистрация корпускулярного излучения. Поскольку корпускулярное излучение, применяемое при измерении состава веществ, чаще всего представляет собой поток заряженных частиц (электронов, ионов), то регистрация излучения может быть осуществлена путем измерения электрического заряда, переносимого частицами на электрод-коллектор. Измерение заряда осуществляется интегрированием силы тока в цепи коллектора по времени: $q = \int Idt$. При измерении очень слабых токов используются усилители электрических сигналов или электронные умножители. По значению измеренного заряда легко определяется количество частиц, приходящих на коллектор за время измерения.

Регистрируемое излучение при взаимодействии с материалом электрода-коллектора наряду с передачей электрического заряда вызывает ряд других эффектов, часть которых оказывает воздействие на результат измерений. К числу таких эффектов относятся эмиссия фотонов, вторичных электронов, распыление материала в виде нейтральных атомов, положительных и отрицательных ионов, удаление адсорбированных молекул. Наибольшую долю в составе эмиттируемых частиц составляют вторичные электроны. Эмиссия заряженных частиц – электронов и ионов – вносит погрешность в результат измерения. Уменьшение погрешности измерений достигается приемами, позволяющими снизить обратный поток вторичных заряженных частиц. При этом применяют специальные антидинаatronные покрытия, а коллектор выполняют в виде цилиндра Фарадея – стакана небольшого диаметра (отношение диаметра которого к длине $D/l \leq 6$), в котором цилиндрическая стенка электри-

чески связана с дном. Вторичные заряженные частицы осаждаются на цилиндрических стенках коллектора. Повышение точности измерений достигается также совершенствованием конструкции и схем включения цилиндра Фарадея. При этом цилиндрическая поверхность коллектора состоит из нескольких электродов, находящихся под различными потенциалами. Для ограничения ухода вторичных электронов используется подавляющий электрод (супрессорная диафрагма или супрессор), находящийся под отрицательным потенциалом и отражающий вторичные электроны. Область супрессорной диафрагмы, в которой отражаются вторичные электроны, экранируется от ионного пучка на входе в цилиндр Фарадея заземленной диафрагмой. Использование заземленной и супрессорной диафрагм предотвращает захват электронов ионным пучком на входе в цилиндр Фарадея и уход электронов из коллектора.

Регистрация высокоэнергетических частиц, в том числе радиоактивных α - и β -излучений, нейтронов и других, может осуществляться с применением детекторов и счетчиков корпускулярного излучения. Различают электронные (вырабатывающие электрический импульс при попадании частицы в объем детектора) и трековые (позволяющие не только зарегистрировать частицу, но и воспроизвести ее траекторию – трек) детекторы. К электронным относятся ионизационные (ионизационная камера, пропорциональный счетчик, счетчик Гейгера), сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы, черенковские счетчики. Черенковские счетчики и полупроводниковые детекторы с полным поглощением применяются не только для регистрации излучения, но и для его спектрометрии. Принцип действия черенковского счетчика рассмотрен в подразд. 2.2.3 (с. 120–121); принцип работы полупроводниковых детекторов изложен ниже в данном подразделе. К трековым детекторам относятся камера Вильсона и ее разновидности – диффузионная, пузырьковая, искровая камеры, а также ядерные фотографические эмульсии.

Основными характеристиками детекторов являются:

- эффективность – вероятность регистрации частицы при ее попадании в рабочий объем детектора;
- временное разрешение – минимальный интервал времени между прохождением через детектор двух частиц;
- время восстановления – время, за которое детектор после регистрации частицы успевает вернуться в исходное состояние и быть готовым для регистрации следующей частицы;
- пространственное разрешение – точность, с которой детектор способен локализовать положение частицы в пространстве.

Спектрометрия корпускулярного излучения. В основе экспериментальных методов измерения состава веществ лежит определение

характера распределения регистрируемого излучения по массам (импульсам) и энергиям частиц. Спектральный анализ излучения лежит в основе принципа действия большой группы аналитических методов, применяемых при измерении состава веществ. Для анализа распределения заряженных частиц по массам (импульсам) и энергиям, т. е. для спектрометрии корпускулярного излучения, также используется действие на частицы электрического и магнитного полей. Причем в магнитном поле возможно разделение заряженных частиц в пучке по удельным зарядам q/m и импульсам mv (массам и скоростям) (см. выражение (2.42)); в электростатическом поле – по кинетическим энергиям.

Аналитические приборы, в основе принципа действия которых лежит разделение ионизированных молекул по массам (удельным зарядам, импульсам) называются масс-спектрометрами, а соответствующий метод исследования состава веществ – масс-спектрометрией.

В зависимости от характера используемых для разделения ионов электрических и магнитных полей масс-спектрометры подразделяют на статические и динамические. В статических масс-спектрометрах для разделения ионов используются постоянные электрические или магнитные поля, в динамических – высокочастотные электрические или взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля. К статическим относятся магнитный и панорамный масс-спектрометры, а к динамическим – циклотронный, времяпролетный, радиочастотный масс-спектрометры, квадрупольный и монополярный масс-фильтры.

Основными параметрами масс-спектрометров являются:

- разрешающая способность, определяемая отношением массового числа регистрируемых ионов к наименьшему различаемому спектрометром изменению массового числа (характеристике ширины спектрального пика);
- диапазон анализируемых масс;
- чувствительность, определяемая отношением изменения ионного тока в цепи коллектора к вызывающему его изменению концентрации регистрируемых ионов и зависящая от рода ионов;
- порог чувствительности – наименьшее определяемое количество ионов;
- максимальное рабочее давление – давление в аналитической камере, при котором отклонение зависимости между ионным током и соответствующей ему концентрацией ионов от линейной (вследствие рассеяния ионов в преобразователе при повышении давления) достигает предельно допустимого значения (обычно 10%).

Рассмотрим принцип действия статических и динамических масс-спектрометров.

Схема простого статического магнитного масс-спектрометра, в основе принципа действия которого лежит разделение ионов по массам в постоянном магнитном поле, представлена на рис. 2.35. Пучок 1 ионизированных молекул, ускоренных напряжением U , направляется через коллимирующую систему узких щелей S_1 и S_2 в пространство между обкладками 2 плоского конденсатора. Напряжение, приложенное к обкладкам, создает между ними однородное электростатическое поле напряженностью E . В этом же пространстве создается однородное магнитное поле индукцией B_1 , силовые линии которого перпендикулярны силовым линиям электростатического поля. В выходную щель S_3 попадают только те ионы, которые во взаимно перпендикулярных полях двигались без отклонения по прямолинейной траектории. Силы, действующие на каждую из этих частиц со стороны электрического и магнитного полей, уравниваются друг друга: $qE = qvB_1$, где v – скорость частицы. Отсюда $v = E / B_1$. В область действия однородного магнитного поля, индукция которого B , через щель S_3 входит узкий пучок ионов различных масс, обладающих одинаковыми скоростями v , направленными перпендикулярно вектору индукции B . В этом поле ионы движутся по дугам, радиусы r которых, в соответствии с выражением (2.42), пропорциональны массам ионов. Ионы различных масс попадают на разные участки детектора, который может представлять собой пластинку с фоточувствительным покрытием или набор коллекторов для измерения ионного тока. Осуществляется разделение ионов пучка по массам, или масс-сепарация ионов, и регистрируется масс-спектр анализируемого вещества.

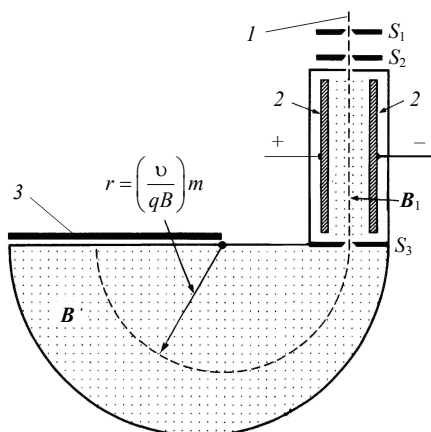


Рис. 2.35. Схема статического магнитного масс-спектрометра:
 1 – пучок анализируемых ионов;
 2 – электроды – обкладки плоского конденсатора; 3 – фотопластинка

Если на пути ускоренных ионов в отклоняющее магнитное поле индукцией B не создавать электрическое E и магнитное B_1 поля, то в область действия магнитного поля через щель S_3 будут поступать ионы с одинаковой в случае одинаковой кратности их заряда энергией, равной qU , но с различными скоростями. Тогда в соответствии с (2.43) радиусы траекторий ионов будут зависеть от значений их удельного заряда q / m .

Плавным изменением напряжения U , ускоряющего ионы, можно осуществить развертку масс-спектра, при которой ионы различных масс поочередно попадают на детектор небольшого размера, установленный на расстоянии, равном $2r$, от щели S_3 . Значение чувствительности магнитного масс-спектрометра $S \approx 10$ мА/Па.

В панорамном масс-спектрометре, принципиальная схема которого приведена на рис. 2.36, молекулы анализируемого газа ионизируются электронами, эмиттируемыми накаливаемым катодом 1, проходящими через диафрагму-модулятор 2 и ускоряемыми полем

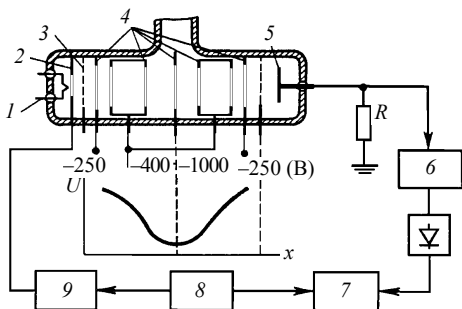


Рис. 2.36. Схема панорамного масс-спектрометра:

- 1 – катод; 2 – диафрагма; 3 – анод;
4 – ускоряющие электроды; 5 – сигнальный электрод; 6 – усилитель; 7 – катодный осциллограф; 8 – генератор развертки; 9 – генератор высокочастотного напряжения

щими через диафрагму-модулятор 2 и ускоряемыми полем сеточного анода 3, находящегося под потенциалом земли. Положительные ионы, образующиеся в результате электронной бомбардировки, ускоряются электростатическим полем с параболическим распределением потенциала, которое создается системой электродов 4. Примерные значения потенциала U , В (относительно земли), на ускоряющих электродах 4 показаны на рис. 2.36. Под воздействием этого поля ионы совершают колебания в пространстве между сеткой 3 и сигнальным

электродом 5, находящимися под нулевыми потенциалами. Частота колебаний ионов не зависит от места их возникновения и определяется выражением

$$v_i = K \sqrt{\frac{qU}{m}}, \quad (2.49)$$

где K – коэффициент пропорциональности, определяемый геометрией прибора; q – заряд иона; U – модуль максимального отрицательного напряжения на центральном электроде; m – масса иона. Каждый вид ионов наводит на сигнальном электроде 5 в соответствии с (2.49) напряжение собственной частоты.

Анализ ионов по массам заключается в измерении частот сигнальных напряжений. Развертка масс-спектра в панорамном масс-спектрометре осуществляется изменением частоты сигнала, подаваемого на модулятор 2 от высокочастотного генератора 9. При совпадении частот гене-

ратора с частотой собственных колебаний ионов определенного вида на сигнальном электроде 5 наводится резонансное напряжение. Это напряжение усиливается высокочастотным усилителем 6 и через демодулятор поступает на вертикально отклоняющую систему катодного осциллографа 7. На горизонтально отклоняющую систему осциллографа подается напряжение от генератора развертки 8, синхронизированное с временной разверткой высокочастотного генератора 9. На экране осциллографа можно видеть одновременно весь спектр ионов.

К числу наиболее универсальных динамических масс-спектрометров относятся квадрупольный и монополярный масс-фильтры.

В квадрупольном масс-фильтре разделение ионов по массовым числам осуществляется в высокочастотном электрическом поле квадрупольа, образованного четырьмя параллельными электродами гиперболического (рис. 2.37) или кругового сечения. Противоположные электроды соединены попарно. Между ними при-

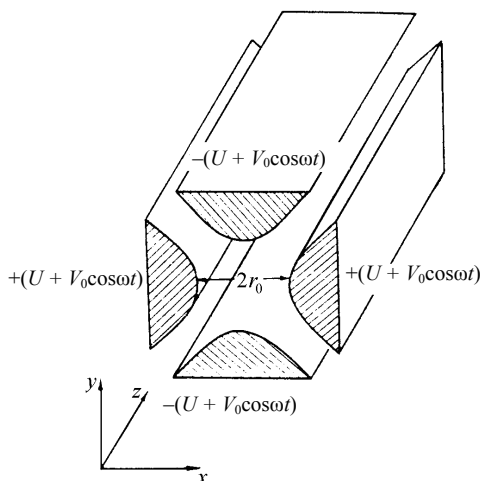


Рис. 2.37. Схема электродов квадрупольного масс-фильтра

кладывается высокочастотное напряжение с амплитудой V_0 совместно с постоянным смещением U : $\pm(U + V_0 \cos \omega t)$, где ω — циклическая частота переменной составляющей прикладываемого напряжения. Ионы анализируемого газа, ускоренные в направлении оси z , перемещаются в высокочастотном поле в пространстве между электродами.

Распределение потенциала электрического поля в любой точке пространства между гиперболическими электродами описывается уравнением

$$\varphi_{xy} = \frac{(U + V_0 \cos \omega t)(x^2 - y^2)}{2r_0^2}, \quad (2.50)$$

где $2r_0$ — расстояние между электродами. Уравнения динамики движения иона с зарядом q и массой m в квадрупольном масс-фильтре имеют вид

$$\begin{cases} m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2q(U + V_0 \cos \omega t) \frac{x}{r_0^2} = 0, \\ m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - 2q(U + V_0 \cos \omega t) \frac{y}{r_0^2} = 0, \\ m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = 0. \end{cases} \quad (2.51)$$

Из последнего уравнения системы (2.51) следует, что проекция скорости ионов на ось анализатора z остается неизменной.

Если ввести два безразмерных параметра

$$a = \frac{4qU}{m\omega^2 r_0^2} \quad \text{и} \quad g = \frac{2qV_0}{m\omega^2 r_0^2}, \quad (2.52)$$

то уравнения движения иона вдоль осей x и y могут быть сведены к дифференциальным уравнениям:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 x}{\partial (\omega t)^2} = -(a + 2g \cos \omega t)x, \\ \frac{\partial^2 y}{\partial (\omega t)^2} = (a + 2g \cos \omega t)y. \end{cases} \quad (2.53)$$

В соответствии с решением системы уравнений (2.53) траектория иона, движущегося в поле квадрупольного масс-спектрометра, имеет характер колебаний с возрастающей во времени амплитудой. Однако, когда значения параметров a и g лежат в определенных диапазонах, амплитуда колебаний ограничена по обеим осям x и y , следовательно, ион будет совершать устойчивые колебания внутри системы электродов с амплитудой меньше r_0 и одновременно двигаться вдоль оси z . Ионы с устойчивой траекторией движения проходят через анализатор и попадают на коллектор. Амплитуда колебаний ионов, движущихся по неустойчивым траекториям, увеличивается, и они теряют свой заряд, попадая на электроды анализатора и не доходя до коллектора.

Область значений параметров a и g , соответствующих устойчивым траекториям ионов, изображена на диаграмме (рис. 2.38) в координатной плоскости g – a . Диаграмма устойчивости траекторий ионов представляет собой криволинейный треугольник; кривая 2 является границей устойчивости по оси y , а отрезок 3 – по оси x .

Выбирая параметры a и g из области устойчивости (т. е. подбирая значения U и V_0), можно определить массы ионов, достигающих коллектора. При постоянном отношении параметров a и g для ионов с различными

массами получаются прямые линии, проходящие через начало координат плоскости g - a . Одна из этих линий 1 , пересекающая область устойчивости вблизи вершины криволинейного треугольника, показана на рис. 2.38. На коллектор анализатора попадают ионы, характеристики которых соответствуют участку этой прямой, расположенному в области устойчивости.

Поскольку каждая точка секущей линии сканирования 1 соответствует определенному массовому числу ионов, то сканирование по массам может быть осуществлено двумя способами: путем одновременного изменения значений U и V_0 при неизменном отношении $a/g = 2U/V_0$ или же путем изменения частоты ω электрического поля при неизменных значениях U и V_0 . Таким образом осуществляется линейное сканирование вдоль секущей линии 1 , которая называется линией сканирования или рабочей линией. Обычно сканирование осуществляется первым способом.

От того как линия сканирования пересекает область устойчивости, зависят разрешающая способность и величина ионного тока (чувствительность) квадрупольного масс-фильтра. Если участок линии сканирования в области устойчивости мал, то малой является и сила ионного тока, но разрешающая способность анализатора в этом случае велика. Если же участок линии сканирования 1 , расположенный внутри треугольника устойчивости, достаточно большой, то ему будут соответствовать значительное количество ионов различных масс, достигающих коллектора, высокий ионный ток, но низкая разрешающая способность. Выбирая соответствующим образом параметры a и g , можно добиться оптимального сочетания разрешающей способности и чувствительности масс-спектрометра. Разрешающая способность анализатора зависит также от длины электродов.

Схема устройства квадрупольного масс-фильтра представлена на рис. 2.39. Молекулы анализируемого газа ионизируются в ионном источнике I , ускоряются в направлении системы электродов прибора и через входную диафрагму 4 впускаются в квадрупольную систему масс-спектрометра. Ионы, прошедшие через межэлектродное пространство,

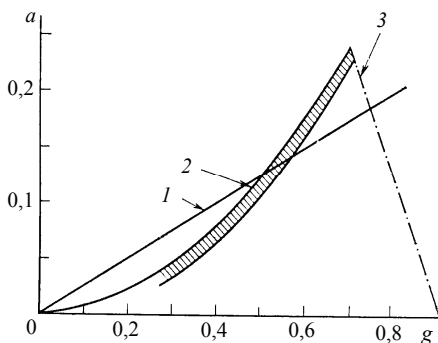


Рис. 2.38. Диаграмма устойчивости работы квадрупольного масс-фильтра:

1 — линия сканирования; 2 — неустойчивость по y ; 3 — неустойчивость по x

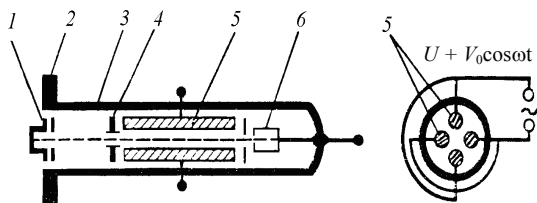


Рис. 2.39. Схема квадрупольного масс-филтра:

1 – ионный источник; 2 – фланец; 3 – корпус;

4 – диафрагма; 5 – стержневые электроды
анализатора; 6 – коллектор ионов

попадают через выходную диафрагму на коллектор 6. Измеряемый в цепи коллектора ионный ток пропорционален числу ионов данной массы, попадающих на коллектор в единицу времени. Поскольку амплитуда колебаний ионов

не зависит от их скорости в направлении оси z , начальная скорость ионов не играет существенной роли, что позволяет использовать для ионизации молекул анализируемого газа несложные ионные источники с большими ионными токами.

В квадрупольных масс-спектрометрах обычно используются цилиндрические электроды, которые проще изготовить с необходимой точностью. Распределение электрического поля в случае цилиндрических электродов приближается к соответствующему распределению поля в гиперболическом квадрупольном масс-филтре при выполнении следующего условия:

$$r = 1,147 r_0, \quad (2.54)$$

где r – радиус цилиндрических электродов; r_0 – половина расстояния между электродами.

Разрешающая способность анализатора зависит от отношения напряжений $\xi = U / V_0$:

$$R = \frac{0,75}{1 - \xi / \xi_{\max}}, \quad (2.55)$$

где $\xi_{\max} = 0,168$. При отношении $\xi \geq \xi_{\max}$ ионы всех масс имеют неустойчивые траектории независимо от других параметров электрического поля в анализаторе. Из выражения (2.55) следует, что для получения высокой разрешающей способности необходимо в процессе измерений выдерживать соотношение $\xi / \xi_{\max} = 0,999$. Массовое число ионов, соответствующих значениям ξ , близким к ξ_{\max} , и имеющих устойчивую траекторию, связано с параметрами электрического поля следующим выражением:

$$M = \frac{1,39 \cdot 10^{-5} V_0}{v^2 r_0^2}, \quad (2.56)$$

где V_0 – амплитуда высокочастотного напряжения, В; $\nu = \omega / 2\pi$ – частота электрического поля, МГц; r_0 – половина расстояния между электродами, м. Ускоряющее напряжение, обеспечивающее начальную скорость ионов в направлении оси z , не должно превышать значения

$$U_z = \frac{420 l^2 \nu^2 M}{R}, \quad (2.57)$$

где l – длина каждого из электродов анализатора, м. При превышении данного значения ионы, движущиеся по неустойчивым траекториям, не будут успевать осаждаться на электродах анализатора, попадут на коллектор, что приведет к нарушению режима работы анализатора.

Монополярный масс-фильтр является разновидностью квадрупольного масс-фильтра, представляет собой один его квадрант и состоит из цилиндрического электрода и угловой пластины (рис. 2.40). На цилиндрический электрод подается высокочастотное напряжение с постоянной составляющей $-(U + V_0 \cos \omega t)$. Пластина находится под нулевым потенциалом (заземлена). Потенциал поля в точке с координатами x , y между электродами монополярного масс-фильтра

$$\varphi_{xy} = \frac{(U + V_0 \cos \omega t)(x^2 - y^2)}{r_0^2}, \quad (2.58)$$

где r_0 – расстояние от цилиндрического электрода до вершины углового.

Если ввести параметры $a_m = 2a$ и $g_m = 2g$, то движение иона в монополярном масс-фильтре может быть описано дифференциальными уравнениями (2.53). Поэтому принцип действия монополярного и квадрупольного масс-фильтров один и тот же. Однако в работе монополярного масс-фильтра имеется ряд особенностей, отличающих его от квадрупольного. Область устойчивости его работы на графике зависимости a_m – g_m превращается в этом случае в узкую полосу, расположенную вблизи границы неустойчивости по оси y (заштрихованная область по рис. 2.38).

Поэтому достоинствами монополярного масс-фильтра являются достаточно высокая разрешающая способность при любых отношениях a_m / g_m и сравнительно простая конструкция.

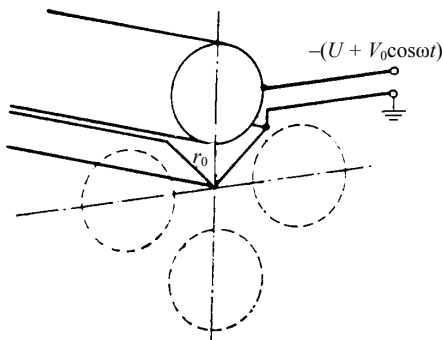


Рис. 2.40. Схема электродов монополярного масс-фильтра

К числу недостатков относится необходимость использования моноэнергетического источника ионов. Кроме того, через монополярный масс-фильтр проходят только ионы, входящие в него во время отрицательного полупериода высокочастотного напряжения. Во время положительного полупериода ионы попадают на угольный электрод и нейтрализуются.

Квадрупольные и монополярные масс-фильтры работают в диапазоне массовых чисел от 1 до 500; их чувствительность $S = 10$ мА/Па; максимальное и минимальное рабочие давления – 10^{-2} и 10^{-8} Па соответственно.

Принцип действия циклотронного масс-спектрометра (омегатрона) (рис. 2.41) основан на разделении ионов анализируемого газа по массам при их движении во взаимно перпендикулярных постоянном магнитном и высокочастотном электрическом полях. Электроны, эмитируемые накаливаемым катодом 1, движутся через сквозные отверстия

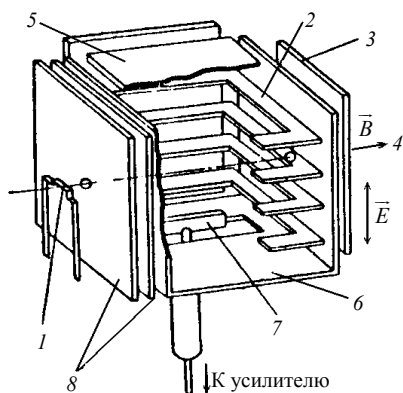


Рис. 2.41. Схема циклотронного масс-спектрометра:

- 1 – катод; 2 – отражающие электроды;
- 3 – анод; 4 – электронный луч;
- 5, 6 – электроды высокочастотного электрического поля; 7 – коллектор ионов;
- 8 – улавливающие пластины

в улавливающих 8, отражающих 2 и анодной 3 пластинах в направлении 4. Осевой электронный пучок 4 производит ионизацию молекул анализируемого газа. Вектор индукции магнитного поля \vec{B} , создаваемого постоянным магнитом, также направлен в ту же сторону, что и пучок электронов (направление 4). Образующиеся ионы под действием магнитной составляющей силы Лоренца могут двигаться по круговым траекториям в плоскости, перпендикулярной направлению силовых линий магнитного поля. Радиус кривизны траектории иона в магнитном поле с индукцией B зависит от удельного заряда иона q/m (см. выражение (2.42)). Период и частота обращения иона определяются выражениями (2.44) и (2.45) и не зависят от скорости иона v . В то же время период и частота зависят от массы иона, вследствие чего возможно разделение ионов по массовым числам.

Высокочастотное переменное напряжение подается на параллельные горизонтальные электроды 5 и 6, а также на отражающие электроды 2, что позволяет создавать поле внутри камеры анализатора более

Высокочастотное переменное напряжение подается на параллельные горизонтальные электроды 5 и 6, а также на отражающие электроды 2, что позволяет создавать поле внутри камеры анализатора более

однородным. В камере масс-спектрометра создается высокочастотное электрическое поле напряженностью $E = E_0 \cos \omega t$. К отражающим электродам 2, имеющим форму прямоугольных рамок, прикладывается также постоянный положительный потенциал, препятствующий попаданию на них ионов, что может приводить к уменьшению их концентрации.

Анализ движения заряженного иона из состояния покоя под действием высокочастотного электрического поля $E = E_0 \cos \omega t$, перпендикулярного постоянному магнитному полю \mathbf{B} , показывает, что ион будет двигаться по траектории в виде плоской спирали, радиус r которой зависит от времени t следующим образом:

$$r = \frac{E_0}{B (\omega - \omega_i)} \sin \frac{\omega - \omega_i}{2} t, \quad (2.59)$$

где ω_i – циклическая частота обращения иона. Таким образом, радиус спирали периодически изменяется со временем, а также зависит от частоты электрического поля ω . При приближении частоты ω к частоте обращения ионов ω_i определенной массы m амплитудное значение r будет возрастать до тех пор, пока не наступит условие резонанса. В этом предельном случае выражение (2.59) примет вид

$$r = \frac{E_0}{2B} t, \quad (2.60)$$

откуда следует, что радиус кривизны траектории иона r возрастает со временем неограниченно. Если коллектор ионов 7 расположен на расстоянии d_c от оси электронного пучка, то на него будут попадать те ионы, для которых выполняется условие

$$\omega - \omega_i < \frac{E_0}{d_c B}, \quad (2.61)$$

т. е. будет наблюдаться довольно острый резонанс. Развертка масс-спектра в омегатроне осуществляется изменением частоты высокочастотного напряжения. Ионы определенной массы m , имеющие циклическую частоту обращения ω_i , совпадающую с частотой высокочастотного напряжения ω или близкую к ней, попадают на коллектор ионов 7. Остальные ионы движутся по траекториям ограниченного радиуса и не достигают коллектора. Измерение ионного тока, проходящего через коллектор, осуществляется электрометрическим усилителем. Циклотронная частота резонансного иона в соответствии с (2.45)

$$\Omega_i = \frac{q}{m} B. \quad (2.62)$$

Основным достоинством времяпролетного масс-спектрометра является высокая скорость развертки спектра. Полный масс-спектр может быть получен всего за несколько микросекунд. В таких приборах используется принцип разделения ускоренных ионов различных масс по времени их пролета пространства дрейфа, в котором электрическое поле отсутствует. Под действием ускоряющего электрического поля с разностью потенциалов U ион приобретает скорость $v = \sqrt{2qU/m}$.

Ускоренный ион попадает в пространство дрейфа, где поле отсутствует, и проходит расстояние l_0 до коллектора за время

$$\Delta t = \frac{l_0}{v} = l_0 \sqrt{\frac{m}{2qU}}. \quad (2.63)$$

Для разделения ионов по массам часто используют разницу во времени пролета расстояния l_0 ионами различных газов.

Принципиальная схема времяпролетного масс-спектрометра представлена на рис. 2.42, *а*. На рис. 2.42, *б* приведены диаграммы напряжений на сеточных электродах 2 и 5. Ионизация молекул анализируемого газа осуществляется пучком электронов между термокатодом 6 и анодом 7. На сетку 5 через определенные интервалы времени подается импульс отрицательного напряжения $-U_5$, ускоряющего ионы. Ускоренные ионы попадают в пространство дрейфа между заземленными сеточными электродами 3 и 4. При прохождении сетки 5 ионы получают одинаковые приращения энергии и приобретают различные в зависимости от масс скорости. Поэтому в пространстве дрейфа ионы разделяются на группы с одинаковыми массовыми числами. В случае когда сетка 2 заземлена, группы ионов поочередно достигают приемника 1, в качестве которого используется вторичный электронный умножитель. Умножитель связан с широкополосным усилителем, выходной сигнал которого подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа. По промежутку времени между выталкивающим импульсом $-U_5$ и моментом появления ионного тока можно в соответствии с (2.63) определить массовое число ионов. Сила ионного тока пропорциональна парциальному давлению газа.

Для непрерывной регистрации спектра только одного компонента газа на сетку 2 подается положительный потенциал, чередующийся с импульсами отрицательного напряжения $-U_2$. Во время подачи этого импульса на приемник 1 попадает группа ионов с определенным массовым числом. Остальные ионы задерживаются положительным потенциалом сетки 2. Путем изменения промежутков времени t_1 и t_2 (см. рис. 2.42, *б*) между импульсами на сетках 5 и 2 выделяются отдельные составляющие масс-спектра.

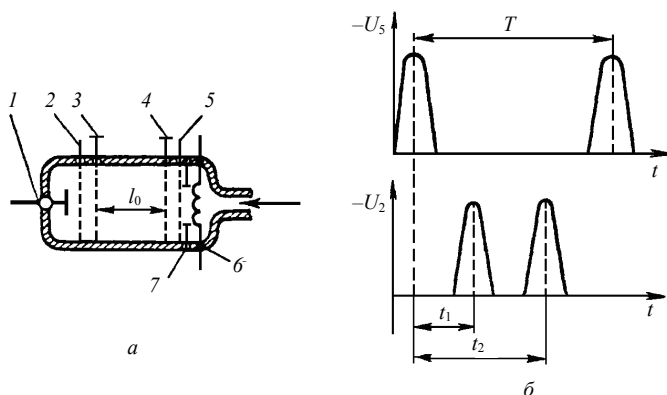


Рис. 2.42. Схема времяпролетного масс-спектрометра (а) и диаграмма напряжений на электродах 2 и 5 (б):
1 – коллектор ионов; 2, 5 – сеточные электроды;
3, 4 – заземленные сетки; 6 – термокатод; 7 – анод

Радиочастотный масс-спектрометр сочетает в себе принципы времяпролетного и резонансного разделения ионов по массовым числам. В резонансном радиочастотном масс-спектрометре ионы анализируемого газа двигаются в высокочастотном электрическом поле по прямолинейным траекториям, проходя через несколько сеточных каскадов.

Схема радиочастотного масс-спектрометра представлена на рис. 2.43. Ионизация молекул анализируемого газа осуществляется пучком электронов в пространстве ионизации между термокатодом 3 и анодом 2. Ионы ускоряются сеточным электродом C_5 в направлении трехсеточного каскада C_2 – C_4 . Между сеткой C_3 и соединенными вместе сетками C_2 и C_4 подается высокочастотное напряжение. Расстояния между сетками C_2 , C_3 и C_4 одинаковы и равны δ .

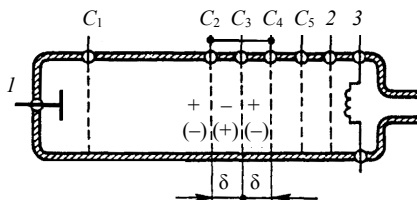


Рис. 2.43. Схема радиочастотного масс-спектрометра:
1 – коллектор ионов; 2 – анод; 3 – катод

Между сетками C_4 и C_3 на ион со стороны высокочастотного электрического поля действует сила

$$F = qE_0 \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (2.64)$$

где E_0 – амплитудное значение напряженности электрического поля; ω – циклическая частота поля; φ_0 – начальная фаза высокочастотного поля,

соответствующая моменту времени пересечения ионом плоскости сетки C_4 ($t = 0$). Между сетками C_3 и C_2 на ион действует такая же периодически изменяющаяся сила, но с обратным знаком:

$$F = -qE_0 \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (2.65)$$

Ионы, фаза которых соответствует высокочастотному полю, получают при прохождении трехсеточного каскада наибольшее приращение энергии и называются резонансными. Время t пролета резонансными ионами трехсеточного каскада равно периоду изменения высокочастотного поля:

$$t = \frac{2\delta}{v} = \frac{2\delta}{\sqrt{2qU/m}} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu}, \quad (2.66)$$

где v – скорость движения ионов; U – ускоряющее ионы напряжение; ν – частота электрического поля. Эти ионы пересекают плоскость сетки C_3 в момент перемены знака поля. Из (2.66) следует выражение для массы резонансных ионов:

$$m = \frac{qU}{2\delta^2 \nu^2}. \quad (2.67)$$

Ионы с другими массами получают меньшее приращение энергии или замедляются. Резонансные ионы с определенным массовым числом достигают коллектора I . Сетка C_1 находится под отрицательным потенциалом и предназначена для отсекаания нерезонансных ионов, обладающих меньшей энергией.

Регистрация масс-спектра ионов осуществляется осциллографом, подключаемым к выходу усилителя. Развертка по массам производится изменением ускоряющего напряжения U либо частоты ν . Для увеличения разрешающей способности радиочастотного масс-спектрометра устанавливается несколько трехсеточных каскадов. Наименьшее измеряемое парциальное давление составляет 10^{-6} Па.

Электростатические анализаторы распределения частиц по энергиям подразделяются на дисперсионные и бездисперсионные. Принцип действия бездисперсионных анализаторов основан на измерении энергии анализируемых заряженных частиц при их торможении электрическим полем без искривления траектории частиц.

В качестве примера рассмотрим принцип работы бездисперсионного энергоанализатора квазисферического типа (рис. 2.44). Пусть требуется анализ распределения по кинетическим энергиям вторичных электронов 3, эмиттируемых из исследуемого образца 4 под действием первичного излучения 2. На полусферический коллектор 5 от источника

постоянного тока подается положительный потенциал в несколько сотен вольт. На пути движения вторичных электронов к коллектору расположены три полусферических сеточных электрода. Крайние сетки 6 и 7 находятся, как и образец 4, под потенциалом земли. Ближайшая к образцу сетка 7 обеспечивает свободное от электрических полей пространство дрейфа электронов между образцом и областью торможения. В этом пространстве электроны перемещаются без изменения скорости. На среднюю сетку 8 подается линейно изменяющийся во времени тормозящий потенциал. Третья заземленная сетка 6 служит для уменьшения электрической емкости между коллектором 5 и тормозящей сеткой 8. При плавном изменении отрицательного тормозящего потенциала сетки 8 на коллектор 5 будут поочередно поступать электроны с различной кинетической энергией. Путем измерения силы тока в цепи коллектора в зависимости от потенциала сетки 8 можно получить спектр распределения вторичных электронов по кинетическим энергиям.

В энергоанализаторах дисперсионного типа слабо расходящийся пучок заряженных частиц входит в тормозящее электрическое поле конденсатора под острым углом к эквипотенциальным поверхностям. Под действием электрического поля траектории частиц искривляются, что при определенных условиях приводит к фокусировке пучка частиц и их разделению по энергиям. Дисперсионные электростатические энергоанализаторы представляют собой конденсаторы различной геометрии.

Рассмотрим принцип распределения электронов по кинетическим энергиям в однородном электростатическом поле плоского конденсатора (рис. 2.45). На электрон, влетающий в однородное тормозящее электростатическое поле со скоростью v_0 под углом θ к эквипотенциальным поверхностям, действует сила, направленная против силовых линий поля. Эта сила сообщает частице ускорение, модуль которого (см. соотношение (2.38)) $a = qE / m$. Запишем уравнения кинематики движения частицы вдоль осей x и y :

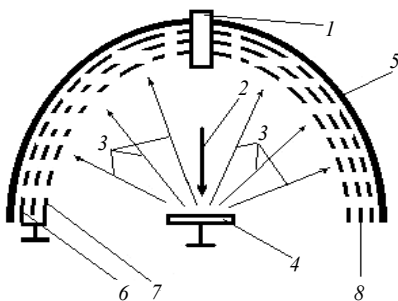


Рис. 2.44. Схема бездисперсионного трехсеточного электростатического анализатора распределения электронов по кинетическим энергиям:

- 1 – источник первичного излучения;
- 2 – поток первичного излучения;
- 3 – траектории регистрируемых вторичных электронов;
- 4 – образец;
- 5 – коллектор электронов;
- 6, 7, 8 – сеточные электроды

$$\begin{cases} x = v_0 \cos \theta \cdot t, \\ y = v_0 \sin \theta \cdot t - a \frac{t^2}{2}. \end{cases} \quad (2.68)$$

Из системы уравнений (2.68) легко получить уравнение траектории частицы:

$$y = x \operatorname{tg} \theta - \frac{qE}{2mv_0^2 \cos^2 \theta} x^2, \quad (2.69)$$

где $E = U / d$ – напряженность электрического поля в конденсаторе; U – напряжение, приложенное к его обкладкам; $mv_0^2 / 2 = E_k$ – кинетическая энергия частицы, влетающей в электрическое поле.

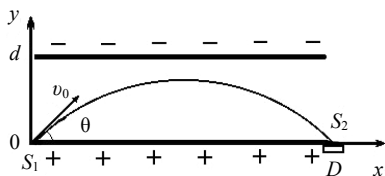


Рис. 2.45. Схема движения электрона в однородном электростатическом поле плоского конденсатора

Траектория заряженной частицы в электростатическом поле зависит от ее кинетической энергии. Поэтому электростатические анализаторы, в отличие от магнитных, разделяют заряженные частицы не по скоростям, а по энергиям.

Электростатические системы позволяют анализировать частицы в широком интервале энергий (от единиц электронвольт до нескольких килоэлектронвольт), отличаются простотой конструкции, небольшими габаритами и массой, часто являются более предпочтительными в сравнении с магнитными анализаторами.

Частица, входящая в плоский конденсатор (рис. 2.45) через щель S_1 , движется по параболической траектории и выходит из конденсатора через щель S_2 , попадая на детектор D . Расстояние между входной S_1 и выходной S_2 щелями

$$x_m = \frac{v_0^2}{a} \sin 2\theta = \frac{mv_0^2}{qE} \sin 2\theta = 2 \frac{E_k}{qE} \sin 2\theta = 2E_k \frac{d}{qU} \sin 2\theta, \quad (2.70)$$

где E_k – кинетическая энергия частицы, Дж.

В частности, для электронов выражение, определяющее расстояние, проходимое частицами между щелями, можно записать в виде

$$x_m = 2E_k \frac{d}{U} \sin 2\theta, \quad (2.71)$$

где E_k – кинетическая энергия частиц, эВ.

Если в область действия электрического поля через входную щель направляется расходящийся пучок частиц, то при $\theta = \pi / 4$ расфокусировка, обусловленная угловым разбросом частиц, будет минимальной. При плавном изменении напряжения U между обкладками конденсатора выполняются условия для поочередного попадания на детектор D частиц с различными кинетическими энергиями, что позволяет получить распределение частиц по энергиям, или энергетический спектр. Возможно также при постоянном напряжении U направление частиц с различными энергиями на многоканальный детектор, каждый из измерительных каналов которого соответствует определенной энергии E_k (интервалу энергий ΔE_k вблизи E_k).

Используются также цилиндрические и сферические электростатические энергоанализаторы. Они представляют собой часть (сектор) цилиндрического либо сектор сферического конденсатора.

Наиболее распространенным типом электростатического энергоанализатора является цилиндрический анализатор, получивший название цилиндрического зеркального. Применяются две схемы цилиндрического зеркального анализатора: с системой фокусировки кольцо – ось или ось – ось (рис. 2.46).

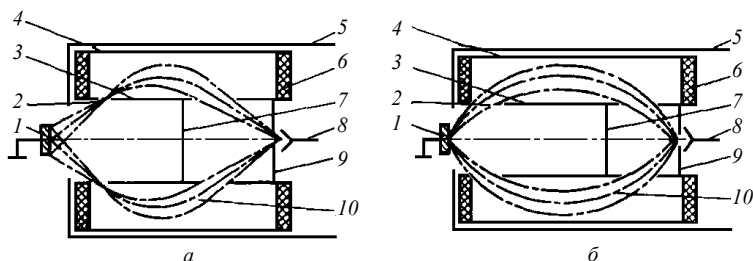


Рис. 2.46. Схемы цилиндрических зеркальных энергоанализаторов с фокусировкой типа:

- a – кольцо – ось; b – ось – ось; 1 – источник заряженных частиц;
2 – кольцевая щель; 3 – внутренний цилиндр с двумя кольцевыми щелями;
4 – внешний цилиндр; 5 – магнитный экран; 6 – изолятор; 7 – перегородка;
8 – коллектор; 9 – диафрагма; 10 – траектории анализируемых частиц

В схеме с фокусировкой типа кольцо – ось (рис. 2.46, a) заряженные частицы, например электроны, испускаемые протяженным источником 1, формируют виртуальный источник на поверхности внутреннего цилиндрического электрода 3. В этом месте находится узкая входная кольцевая щель 2 шириной в несколько десятых долей миллиметра. Частицы с одинаковой энергией, входящие через щель 2 в область действия тормозящего электростатического поля между цилиндрическими

электродами 3 и 4, движутся по траекториям 10 и, проходя через вторую кольцевую щель во внутреннем цилиндре 3, попадают на коллектор 8. В схеме с фокусировкой типа ось – ось (рис. 2.46, б) источник 1 анализируемых частиц является точечным и располагается на оси анализатора. Частицы определенной энергии также проходят через две кольцевые щели во внутреннем цилиндре 3 и фокусируются на коллекторе 8. Изменяя величину тормозящего напряжения между цилиндрическими электродами 3 и 4, можно регистрировать частицы различных энергий.

Для регистрации и спектрометрии частиц, обладающих энергиями от сотен килоэлектронвольт до десятков мегаэлектронвольт, применяются полупроводниковые детекторы – энергоанализаторы.

Рассмотрим принцип действия такого прибора на примере поверхностно-барьерного кремниевого детектора. Он представляет собой пластину из монокристалла кремния толщиной в несколько миллиметров с проводимостью n -типа (рис. 2.47). Вблизи одной из поверхностей пластины сформирован тонкий слой с дырочной p -проводимостью. Между областями с различными типами проводимости

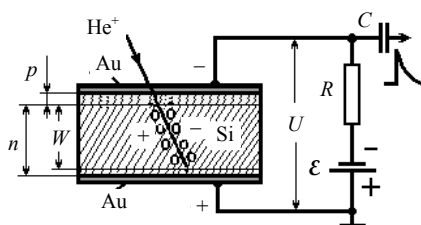


Рис. 2.47. Схема поверхностно-барьерного кремниевого детектора

образуется p - n -переход. На обе поверхности пластины осаждаются тонкие контактные пленки золота, которые являются электродами. К электродам прикладывается электрическое напряжение в несколько киловольт.

Регистрируемая частица, например высокоэнергетичный

ион He^+ , при проникновении в кристалл генерирует в нем неравновесные носители тока – электронно-дырочные пары. Под действием приложенного электрического поля носители заряда (электроны и дырки) рассасываются, перемещаясь к электродам. Для достижения достаточно высокой чувствительности детектора необходимо, чтобы в отсутствие регистрируемых частиц полупроводник имел минимальную проводимость, т. е. был обеднен носителями тока. Для этого на p - n -переход подается обратное запирающее напряжение U . Слой полупроводника вблизи границы p - n -перехода, обедненный носителями тока и обладающий высоким удельным электрическим сопротивлением, является чувствительным слоем детектора. Толщина чувствительного слоя поверхностно-барьерных детекторов составляет несколько миллиметров.

Концентрация неравновесных электронно-дырочных пар пропорциональна пробегу регистрируемой заряженной частицы в чувствитель-

ном слое детектора, а следовательно, энергии частицы. Генерируемые в чувствительной области под воздействием налетающей частицы электронно-дырочные пары увлекаются сильным электрическим полем к электродам. Электрический заряд, поступающий на электроды детектора, пропорционален энергии, выделенной частицей при прохождении через чувствительный слой. Поэтому если частица полностью тормозится в этом слое, детектор работает как спектрометр (энергоанализатор), позволяющий проанализировать распределение регистрируемых частиц по энергиям. При прохождении частицы через чувствительный слой во внешней цепи детектора, включающей конденсатор, формируется электрический импульс, амплитуда которого пропорциональна числу электронно-дырочных пар, которое, в свою очередь, пропорционально энергии регистрируемой частицы. Затем электрический импульс усиливается и регистрируется.

Поскольку энергия, необходимая в среднем для образования одной электронно-дырочной пары, мала (в кремнии – 3,8 эВ, в германии – 2,9 эВ), то полупроводниковые детекторы обладают высокой разрешающей способностью по энергии E_k : $\Delta E_k / E_k \approx 1\%$ при $E_k \sim 10$ кэВ и $\Delta E_k / E_k \approx 0,1\%$ при $E_k \sim 1000$ кэВ. Если частица тормозится в чувствительном слое полностью, то эффективность ее регистрации составляет $\sim 100\%$. Большая подвижность носителей тока в полупроводнике позволяет собирать заряд на электродах за время $\sim 10^{-8}$ с, что обеспечивает высокое временное разрешение детектора.

Высокие значения чувствительности и энергетического разрешения поверхностно-барьерного детектора могут быть достигнуты лишь при охлаждении до температуры испарения жидкого азота (77,36 К). При комнатной температуре из-за малой ширины запрещенной зоны в кремнии и германии концентрация носителей тока достаточно велика, а при охлаждении она экспоненциально уменьшается. Кроме того, при охлаждении существенно увеличивается подвижность носителей тока.

Поверхностно-барьерные полупроводниковые детекторы используются для спектрометрии осколков деления атомных ядер и α -частиц с энергиями ≤ 20 МэВ (в том числе высокоэнергетичных ионов гелия, претерпевших резерфордское обратное рассеяние), протонов с энергиями ≤ 5 МэВ, электронов с энергиями ≤ 200 кэВ. При таких энергиях пробег частиц еще полностью укладывается в чувствительном слое поверхностно-барьерного полупроводникового детектора, и детектор оказывается чувствительным к регистрации и спектрометрии частиц.

Для спектрометрии высокоэнергетичного корпускулярного излучения, а также характеристического рентгеновского излучения и γ -излучения используются диффузионно-дрейфовые полупроводниковые

детекторы из высокочистого германия, а также из кремния и германия с примесью лития. В отличие от поверхностно-барьерных детекторов диффузионно-дрейфовые имеют $p-i-n$ -структуру, и чувствительный слой детектора расположен в области полупроводника, обладающей собственной (i) проводимостью. Примесные ионы лития, двигаясь под действием приложенного электрического поля в p -области, компенсируют действие акцепторных примесей и создают широкую чувствительную i -область собственной проводимости, толщина которой определяется глубиной диффузии ионов лития. Введение между p - и n -слоями слоя с собственной проводимостью ($p-i-n$ -структура) позволяет увеличить толщину чувствительного слоя детектора до 10–15 мм, что необходимо для регистрации и спектрометрии рентгеновских фотонов и γ -квантов, обладающих высокой проникающей способностью.

Регистрируемые кванты электромагнитного излучения возбуждают неравновесные электронно-дырочные пары, а также при взаимодействии с атомами чувствительного слоя передают энергию электронам в результате фотоэффекта и комптоновского рассеяния, которые также участвуют в образовании неравновесных носителей тока. Регистрируются электрические импульсы, чьи амплитуды пропорциональны числу электронно-дырочных пар, которые, в свою очередь, пропорциональны энергиям регистрируемых квантов или частиц.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Опишите принципы регистрации корпускулярного излучения. Перечислите основные характеристики детекторов излучения.
2. Поясните принципы разделения заряженных частиц в пучке по импульсам в магнитном поле.
3. Опишите принцип масс-спектрометрического измерения состава веществ. Перечислите типы и основные параметры масс-спектрометров.
4. Поясните принципы действия статических масс-спектрометров: магнитного и панорамного.
5. Опишите принцип действия динамических масс-спектрометров: квадрупольного и монополярного масс-фильтров.
6. Поясните принципы действия динамических масс-спектрометров: циклотронного, времяпролетного и радиочастотного.
7. Опишите принцип действия бездисперсионного электростатического энергоанализатора.
8. Поясните принцип действия дисперсионных электростатических энергоанализаторов.
9. Опишите устройство и принцип действия цилиндрических зеркальных электростатических энергоанализаторов.

10. Поясните устройство и принцип действия полупроводникового поверхностно-барьерного детектора-энергоанализатора.
11. Изложите особенности диффузионно-дрейфовых полупроводниковых детекторов рентгеновского и γ -излучений.

2.4. Измерения состава веществ, основанные на исследовании электронной структуры атомов

Основными структурными элементами строения всех веществ являются молекулы, состоящие, в свою очередь, из атомов. Поэтому методы измерений состава веществ, основанные на исследовании электронной структуры атомов, дают непосредственную информацию о природе вещества.

2.4.1. Электронная структура атомов. Излучение электромагнитной энергии атомами

Общепринятой является ядерная модель атома, в основе которой лежат представления об атоме как о системе, в центре которой находится положительно заряженное ядро, состоящее из протонов и нейтронов, вблизи ядра находятся электроны.

Уравнение Шрёдингера и особенности его решения для атома водорода. Строение атома, как и любой другой квантовомеханической системы, описывается в квантовой механике с применением уравнения Шрёдингера. Уравнение Шрёдингера (1926 г.) является основным динамическим уравнением нерелятивистской квантовой механики, описывает состояние квантовой системы и имеет вид

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + V\Psi, \quad (2.72)$$

где $\hbar = h / (2\pi) = 1,054\,588\,7(57) \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; m – масса квантовомеханической частицы (в частности, электрона); Ψ – волновая функция (функция состояния) частицы; V – потенциальная энергия частицы, находящейся в силовом поле; Δ – оператор Лапласа. Оператор Лапласа представляет математическую операцию дифференцирования по координатам и в прямоугольной декартовой системе координат:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (2.73)$$

По своей структуре уравнение Шрёдингера является волновым уравнением. Оно играет такую же фундаментальную роль в квантовой

механике, как уравнения динамики движения в классической механике и уравнения Максвелла в классической электродинамике.

В уравнении (2.72) потенциальная энергия и волновая функция зависят от координат и времени:

$$V = V(x, y, z, t) = V(\mathbf{r}, t) \text{ и } \Psi = \Psi(x, y, z, t) = \Psi(\mathbf{r}, t),$$

и уравнение Шрёдингера (2.72) называется временным. Квадрат модуля волновой функции, или произведение волновой функции $\Psi(\mathbf{r}, t)$ на комплексно сопряженную ей функцию $\Psi^*(\mathbf{r}, t)$, определяет плотность вероятности нахождения частицы в точке с координатой \mathbf{r} в момент времени t :

$$\Psi(\mathbf{r}, t) \Psi^*(\mathbf{r}, t) = \omega. \quad (2.74)$$

Если потенциальная энергия частицы не зависит от времени, то и ее волновая функция будет зависеть только от координат.

Волновая функция в (2.72) может быть представлена как произведение двух функций, одна из которых зависит только от координат, а вторая – только от времени:

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = \psi(\mathbf{r}) \varphi(t), \text{ или } \Psi = \psi \varphi. \quad (2.75)$$

Подставляя (2.75) в (2.72), получим:

$$i\hbar\psi \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\hbar^2}{2m} \varphi \Delta\psi + V(\mathbf{r}) \psi \varphi;$$

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{\psi} \Delta\psi - V = -i\hbar \frac{1}{\varphi} \frac{d\varphi}{dt}. \quad (2.76)$$

В выражение, стоящее в правой части уравнения (2.76), входит зависимость только от времени, а в левой части – только от координат. Это равенство может удовлетворяться только при условии, что обе его части равны между собой, а следовательно выражение, стоящее в правой части, так же как и в левой, не зависит от времени. Введя обозначение

$$E = i\hbar \frac{1}{\varphi} \frac{d\varphi}{dt}, \quad (2.77)$$

получим

$$\frac{\hbar^2}{2m} \Delta\psi + (E - V)\psi = 0$$

или

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V)\psi = 0. \quad (2.78)$$

Уравнение (2.78) является уравнением Шрёдингера для стационарных состояний, описывающим состояние квантовомеханической системы, параметры которой не зависят от времени, или стационарным уравнением Шрёдингера. Здесь E – полная энергия системы. Значения энергии E , при которых существуют решения стационарного уравнения Шрёдингера, называются собственными значениями, а волновые функции, удовлетворяющие этому уравнению, – собственными функциями.

Уравнение Шрёдингера строго решено для наиболее простого атома – атома водорода, состоящего из ядра и одного электрона. Потенциальная энергия кулоновского взаимодействия электрона с ядром

$$V = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad (2.79)$$

где e – величины зарядов электрона и ядра (протона); r – расстояние между ними. Тогда стационарное уравнение Шрёдингера для атома водорода запишется в виде

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0. \quad (2.80)$$

Если записать это уравнение в полярной системе координат r, θ, ϕ , которые связаны с декартовой системой координат x, y, z следующим образом: r – радиус-вектор точки; θ – угол между радиус-вектором точки и осью z ; ϕ – угол между осью x и проекцией точки на плоскость xu , то получается

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \\ & + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0. \end{aligned} \quad (2.81)$$

Волновые функции ψ , удовлетворяющие уравнению Шрёдингера в виде (2.81), находят как произведение трех волновых функций, каждая из которых зависит от одной из полярных координат:

$$\psi = R(r) \Theta(\theta) \Phi(\phi), \quad (2.82)$$

где $R(r)$ – радиальная волновая функция; $\Theta(\theta)$ и $\Phi(\phi)$ – соответственно угловые волновые функции.

После подстановки (2.82) в уравнение (2.81) получается

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial R}{\partial r} \right) + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) r^2 =$$

$$= -\frac{1}{\Theta \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \Theta}{\partial \theta} \right) - \frac{1}{\Phi \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \phi^2}. \quad (2.83)$$

Левая часть уравнения (2.83) зависит только от расстояния r , а правая – только от угловых координат θ и ϕ . Для того чтобы уравнение (2.83) выполнялось при всех значениях r , θ и ϕ , необходимо, чтобы каждая из его частей была равной некоторой постоянной величине λ' . Тогда можно получить

$$\frac{\sin \theta}{\Theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \Theta}{\partial \theta} \right) + \lambda' \sin^2 \theta = -\frac{1}{\Phi} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \phi^2} \quad (2.84)$$

и

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial R}{\partial r} \right) + \left[\frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) - \frac{\lambda'}{r^2} \right] R = 0. \quad (2.85)$$

Уравнение (2.84) также можно расчленить на два:

$$\frac{\sin \theta}{\Theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \Theta}{\partial \theta} \right) + \lambda' \sin^2 \theta = m_l^2; \quad (2.86)$$

$$\frac{1}{\Phi} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \phi^2} = -m_l^2, \quad (2.87)$$

где m_l – некоторая постоянная.

Решение уравнения Шрёдингера (2.72) для атома водорода сводится к решению уравнений (2.85), (2.86) и (2.87). Решение каждого из этих уравнений дает набор волновых функций: радиальных $R(r)$, а также угловых $\Theta(\theta)$ и $\Phi(\phi)$. В частности, решением уравнения (2.87) являются функции

$$\Phi(\phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(im_l \phi), \quad (2.88)$$

где m_l должно быть положительным или отрицательным целым числом. Решения уравнений (2.85) и (2.86) также дают наборы волновых функций $R(r)$ и $\Theta(\theta)$. Причем волновые функции $\Theta(\theta)$ зависят от чисел m_l и l (где l связано с λ' соотношением $\lambda' = l(l+1)$), которые могут принимать значения:

$$l = 0, 1, 2, 3, \dots;$$

$$m_l = l, (l-1), (l-2), \dots, 0, -1, -2, \dots, -l.$$

Радиальные волновые функции $R(r)$, получаемые решением уравнения (2.85), оказываются зависящими от числа l . Из уравнения (2.85) получается также следующее выражение для полной энергии системы:

$$E_n = -R^* hc \frac{1}{n^2}, \quad (2.89)$$

где n – еще одно целое число, которое может принимать любые положительные целые значения, начиная с 1. Кроме того, значения, которые может принимать число l , связаны со значением n таким образом, что

$$l = (n - 1), (n - 2), \dots, 0.$$

Коэффициент пропорциональности R^* в (2.89) выражается через фундаментальные постоянные величины, является величиной постоянной и называется постоянной Ридберга:

$$R^* = \frac{me^4}{8h^3 \epsilon_0^2 c}. \quad (2.90)$$

Значение постоянной Ридберга, полученное путем квантовомеханического расчета в предположении бесконечно большой массы ядра (ядро неподвижно), $R = 10\,973\,731 \pm 0,83 \text{ м}^{-1}$. Приближенное значение $R \approx 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

Выражение для энергии атома водорода также можно записать в виде

$$E_n = -R^{**} h \frac{1}{n^2}, \quad (2.91)$$

где R^{**} – постоянная Ридберга, выраженная в единицах частоты. Значение $R^{**} \approx 3,288 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$.

Из (2.89) и (2.91) следует, что энергия атома водорода (энергия электрона в атоме) может принимать лишь определенный набор значений, зависящих от числа n . Энергия атома квантуется; характер квантования определяется главным квантовым числом n .

Для одноэлектронных водородоподобных атомов других элементов, состоящих из ядра, заряд которого равен Ze , и одного электрона, т. е. для сильно ионизированных атомов, набор энергетических состояний можно определить аналогично (2.89) и (2.91):

$$E_n = -Z^2 \frac{R^* hc}{n^2}; \quad (2.92)$$

$$E_n = -Z^2 \frac{R^{**} h}{n^2}. \quad (2.93)$$

Строение атома водорода. Электронные орбитали. Получаемый при решении уравнения Шрёдингера набор радиальных и угловых волновых функций определяет плотность вероятности нахождения электрона в той или иной точке пространства вблизи ядра. Волновые функции

зависят от значения главного квантового числа, а также от квантовых чисел l и m_l . Число l называют орбитальным квантовым числом, а m_l – магнитным квантовым числом. Области пространства вблизи ядра, отображающие вероятность нахождения электрона и определяемые волновыми функциями, называют электронными орбиталями. Часто форму электронных орбиталей представляют по набору квантовых чисел, характеризующих состояние атома, и изображают в пространстве таким образом, что внутри сферы сосредоточена большая часть (~90%) электронной плотности (рис. 2.48). Знаки «+» и «-» на рис. 2.48 соответствуют знаку волновой функции.

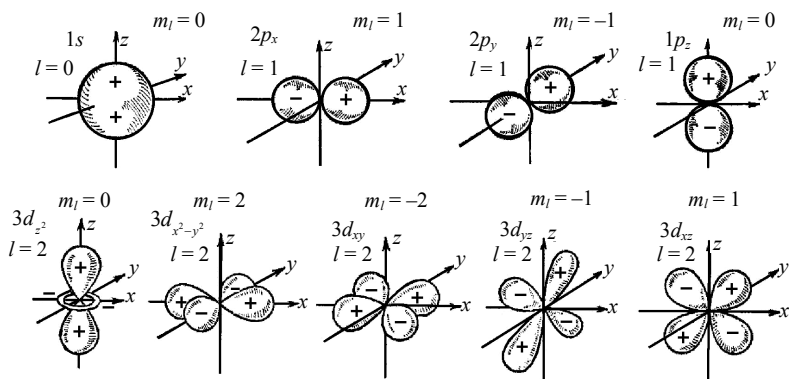


Рис. 2.48. Схемы пространственного расположения атомных s -, p - и d -орбиталей

При обозначении состояния атома и соответствующей орбитали используют число и букву. Число представляет собой главное квантовое число n . Значениям орбитального квантового числа l соответствуют буквы:

$l =$	0	1	2	3	4	5
	s	p	d	f	g	h

Изображения, приведенные на рис. 2.48, иллюстрируют форму электронных орбиталей и их расположение в пространстве при различном наборе квантовых чисел. Однако распределение плотности существенно зависит и от энергии атома. При увеличении энергии, а следовательно, и главного квантового числа n симметрия электронных орбиталей для одного и того же состояния сохраняется, но электронная плотность распространяется на большее расстояние от центра атома. На рис. 2.49 приведены графики зависимостей плотности вероятности ω от относительного расстояния r/a_0 (где $a_0 = 0,529 \cdot 10^{-10}$ м – радиус первой борвской орбиты электрона в атоме водорода) для $1s$ -, $2s$ - и $3s$ -состояний. Аналогичная зависимость электронной плотности от энергии имеет место и для орбиталей другой симметрии (p , d , f и т. д.).

Каждому состоянию атома (состоянию электрона в атоме) соответствует определенное распределение электронной плотности (электронная орбиталь), а также определенное значение энергии, или энергетический уровень. Причем форма электронной орбитали и энергия электрона в атоме взаимосвязаны.

В первом приближении (см. формулы (2.89) и (2.91)) энергия определяется главным квантовым числом n . При сообщении атому дополнительной энергии извне он поглощает энергию квантами и переходит из основного состояния в возбужденное состояние с большей энергией. Возбужденное состояние является неустойчивым, и атом спонтанно переходит в одно из возможных состояний с меньшей энергией. При таком переходе он испускает фотон, или квант электромагнитной энергии:

$$h\nu = E_{n_i} - E_{n_j}, \quad (2.94)$$

где E_{n_i} и E_{n_j} – энергии электрона в атоме в тех состояниях, между которыми совершается переход. Соответственно, частота спонтанного излучения

$$\nu = \frac{E_{n_i} - E_{n_j}}{h}. \quad (2.95)$$

Подставляя (2.92) и (2.93) в (2.95), получим выражения для частоты ν :

$$\nu = Z^2 R^{**} \left(\frac{1}{n_j^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (2.96)$$

и длины волны λ :

$$\frac{1}{\lambda} = Z^2 R^* \left(\frac{1}{n_j^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (2.97)$$

излучения, испускаемого атомом при переходе из состояния, характеризуемого главным квантовым числом n_i , в состояние с n_j .

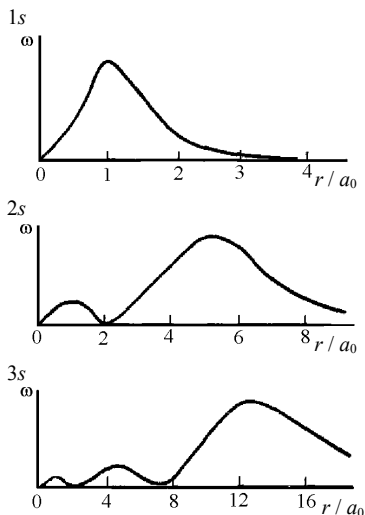


Рис. 2.49. Характер зависимостей плотности вероятности ω нахождения электрона в 1s-, 2s- и 3s-состояниях от r/a_0

Рассмотренные выше соотношения получены для атома водорода ($Z = 1$) и для водородоподобных атомов. Они хорошо согласуются с экспериментальными данными, получаемыми при анализе атомных спектров. В частности, в оптическом спектре водорода (рис. 2.50) наблюдаются спектральные линии, которые объединяются в спектральные серии по состоянию (квантовому числу n_j), в которое совершаются электронные переходы из более высокоэнергетических состояний, и спектр полностью описывается соотношениями (2.96), (2.97).

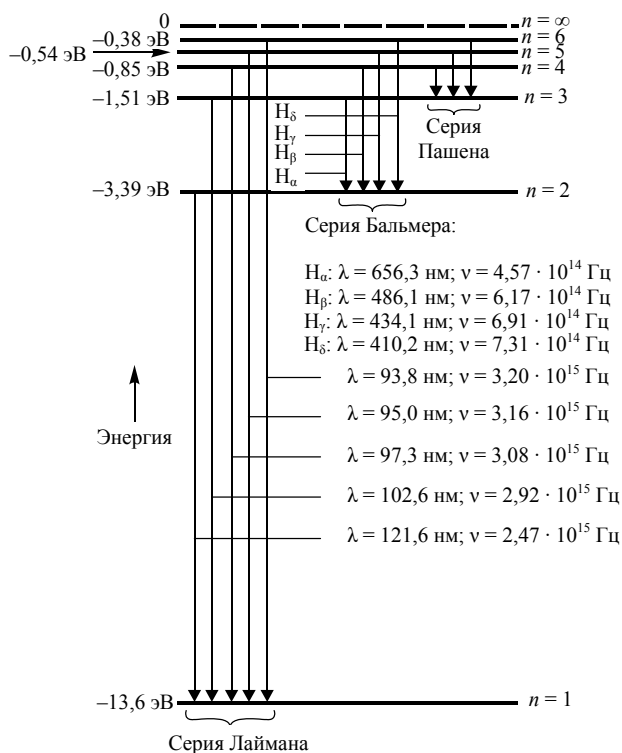


Рис. 2.50. Схема энергетических уровней и излучательных переходов атома водорода

Энергия электрона в атоме водорода, находящемся в основном состоянии, $E_1 = -13,6$ эВ. Соответственно, энергия ионизации E_i атома водорода составляет 13,6 эВ. Эта величина принята за внесистемную единицу измерения энергии в атомной физике – Ридберг ($1 \text{ Ry} = 13,6 \text{ eV}$).

Для других атомов задача расчета энергетических состояний значительно усложняется, и такой расчет выполняется приближенными и чис-

ленными методами. При этом в многоэлектронных атомах проявляется ряд дополнительных особенностей. Кроме того, ряд внешних воздействий оказывает влияние на электронную структуру атомов. Основные из возникающих особенностей мы рассмотрим при дальнейшем изучении материала (см. подразд. 2.4.3).

Итак, из решения уравнения Шрёдингера следует:

- квантование энергии электрона в атоме (см. формулы (2.89) и (2.91)), характеризуемое главным квантовым числом n ;
- квантование момента импульса электрона в атоме:

$$L_l = \sqrt{l(l+1)} \cdot \hbar, \quad (2.98)$$

характеризуемое орбитальным квантовым числом l ;

- квантование проекции вектора момента импульса L_l электрона в атоме на направление внешнего магнитного поля (ось z) (пространственное квантование) по магнитному орбитальному квантовому числу m_l :

$$L_{l_z} = m_l \hbar. \quad (2.99)$$

Главное квантовое число n определяет электронную оболочку атома. Орбитальное квантовое число l характеризует подоболочки и симметрию (форму) электронных орбиталей. В подоболочке с квантовым числом l содержится $2l + 1$ орбиталей. Все орбитали одной подоболочки в обычных условиях имеют одинаковые значения энергии (вырождены). Под влиянием внешнего магнитного поля энергии электронов орбитали расщепляются (снятие вырождения) по магнитному орбитальному квантовому числу m_l , которое может принимать целочисленные значения в пределах: $-l \leq m_l \leq +l$. В зависимости от квантового числа m_l изменяется расположение электронных орбиталей в пространстве (см. формулу (2.99) и рис. 2.48) (пространственное квантование).

Спин и собственный магнитный момент электрона. На основании результатов, полученных в опытах Штерна и Герлаха (1921 г.) по отклонению атомов в неоднородном магнитном поле и при анализе структуры спектров излучения щелочных металлов, Уленбеком и Гаудсмитом в 1925 г. введена концепция собственного момента электрона, названного спином. При воздействии неоднородного магнитного поля пучок атомов одновалентных металлов разделяется на два пучка одинаковой интенсивности. В атомных спектрах одновалентных щелочных металлов наблюдаются дублетные линии (см. подразд. 2.4.3).

Спин электрона квантуется по закону

$$L_s = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar, \quad (2.100)$$

где s – спиновое квантовое число. Проекция спина электрона на направление внешнего магнитного поля имеет два значения ($2s + 1 = 2$), поэтому $s = 1/2$, и квантуется по закону

$$L_{s_z} = m_s \hbar, \quad (2.101)$$

где m_s – магнитное спиновое квантовое число ($m_s = \pm 1/2$). Модуль

спина электрона $L_s = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2} + 1\right)} \hbar = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$. Спин электрона не связан с

движением частицы как целого, является неотъемлемым внутренним свойством электрона, таким же как масса и заряд. Спином обладают и другие элементарные частицы.

Учет спина электрона позволил Паули в 1925 г. сформулировать принцип запрета, утверждающий, что в произвольной физической системе (в том числе в атоме) не может быть двух электронов, находящихся в одном и том же квантовом состоянии. Принцип Паули позже был распространен на все фермионы (квантовые частицы с полуцелым спином).

Последовательность заполнения электронных оболочек в многоэлектронных атомах (при рассмотрении в порядке расположения элементов в периодической системе) основывается на принципе Паули и принципе минимума энергии. Электронные оболочки (K, L, M, N, O) определяются значением главного квантового числа n . Идеальная схема заполнения электронных оболочек состоит в том, что каждый вновь присоединяющийся электрон связывается с атомом в состоянии с наименьшими допустимыми принципом Паули значениями квантовых чисел n и l . По окончании заполнения оболочки образуется устойчивая электронная конфигурация, соответствующая конфигурации атома благородного газа. После этого начинается заполняться следующая оболочка. Последовательность заполнения электронных состояний в пределах подгруппы (при одном и том же значении l) определяется правилом Хунда: вначале заполняются состояния с различными значениями магнитного квантового числа m_l при одинаковом значении проекции спина m_s ; после того как все $2l + 1$ состояния по квантовому числу m_l оказываются заполненными электронами с одинаковой проекцией спина, начинается их заполнение электронами с противоположной проекцией спина. Заполнение электронных состояний в атомах элементов первых трех периодов периодической системы соответствует идеальной схеме; начиная с калия, имеют место отклонения от нее. Причина различий между реальной и идеальной схемами заполнения обусловлена взаимодействием электронов между собой и отклонением силового поля, действующего на электроны в атоме, от кулоновского.

Для объяснения экспериментальных фактов наряду со спином предполагается наличие у электрона магнитного момента. Собственный магнитный момент электрона связан со спином соотношением

$$\mu_s = -\frac{e}{m} L_s. \quad (2.102)$$

Проекция собственного магнитного момента электрона на ось z (с учетом (2.101))

$$\mu_{s_z} = \pm \frac{e}{2m} \hbar. \quad (2.103)$$

Единицей измерения магнитного момента является магнетон Бора

$$\mu_B = \frac{e}{2m} \hbar; \quad (2.104)$$

его значение:

$$\mu_B = 9,274\,078\,(36) \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2 = 9,274\,078\,(36) \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}.$$

Тогда проекция собственного магнитного момента электрона на направление внешнего магнитного поля (на некоторое выделенное направление)

$$\mu_{s_z} = \pm \mu_B, \quad (2.105)$$

а его величина (модуль)

$$\mu_s = \sqrt{3} \cdot \mu_B. \quad (2.106)$$

Спин-орбитальное взаимодействие. Наличие собственного магнитного момента у электрона позволяет объяснить дублетную структуру спектров щелочных металлов, обусловленную дополнительным взаимодействием электрона с ядром, которое называется спин-орбитальным.

Спин-орбитальное взаимодействие обусловлено, в свою очередь, взаимодействием собственного магнитного момента электрона в атоме с его орбитальным моментом (или движением электрона вблизи ядра). Сущность спин-орбитального взаимодействия можно выяснить из следующих соображений. Электрон, обладающий электрическим зарядом и магнитным моментом, движется в электрическом поле ядра, а также других электронов. Кулоновское взаимодействие электрона с ядром учитывается при решении уравнения Шрёдингера. Однако наряду с электрическим взаимодействием в атоме проявляется и магнитное взаимодействие. Если выбрать систему отсчета, связанную с электроном, то относительно такой системы ядро движется и, следовательно, создает вокруг себя как электрическое, так и магнитное поле. Магнитное поле

ядра с эффективной индукцией $B_{\text{эф}}$ взаимодействует с собственным магнитным моментом электрона. Поскольку собственный магнитный момент электрона может ориентироваться относительно направления магнитного поля лишь двумя способами (см. соотношение (2.103)), то энергия соответствующего взаимодействия может принимать два значения:

$$E_{sl} = \mu_s B_{\text{эф}} = \pm \frac{e}{2m} \hbar B_{\text{эф}} = \pm \mu_B B_{\text{эф}}. \quad (2.107)$$

Энергия E_{sl} спин-орбитального взаимодействия является поправкой (в зависимости от знака прибавляется или вычитается) к энергии соответствующего энергетического уровня E_n атома. В результате энергетический уровень электрона в атоме расщепляется на два подуровня. Расщепление уровней на подуровни вследствие спин-орбитального взаимодействия приводит к так называемой тонкой структуре уровней и тонкой структуре спектров.

Такому расщеплению подвергаются не все уровни. Для электронов, находящихся в s -состояниях ($l = 0$; $L_l = 0$), спин-орбитальное взаимодействие отсутствует и соответствующие энергетические s -уровни не расщепляются, они являются синглетными.

В результате спин-орбитального взаимодействия спин L_s и орбитальный момент импульса L_l объединяются в полный момент импульса L_j . Поскольку L_s и L_l квантуются (см. формулы (2.100) и (2.98)), то квантуется и полный момент электрона в атоме:

$$L_j = \sqrt{j(j+1)} \cdot \hbar, \quad (2.108)$$

где j – квантовое число полного момента. Для данного l оно может принимать только два значения:

$$j = l + m_s = l \pm \frac{1}{2}. \quad (2.109)$$

В случае $l = 0$ принимается $j = 1/2$.

Тонкая структура энергетических уровней, обусловленная спин-орбитальным взаимодействием, полностью объясняет дублетную структуру спектров излучения щелочных металлов.

Теория строения атома была призвана объяснить экспериментально наблюдаемые оптические спектры и развивалась в этом направлении, основываясь на экспериментальных данных. К настоящему времени атомные спектры всех элементов изучены. Также разработаны методы анализа состава веществ, в основу которых положено исследование электронной структуры атомов элементов, входящих в состав вещества. К таким методам относятся атомная оптическая спектроскопия, рентге-

новский спектральный микроанализ, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия и оже-электронная спектроскопия.

Спектральный анализ веществ любым из перечисленных методов включает следующие операции: возбуждение атомов вещества путем сообщения энергии извне; испускание электромагнитного либо корпускулярного излучения атомами при их переходах из возбужденных состояний; получение, регистрация, обработка и расшифровка спектра.

Атом каждого элемента обладает определенным набором энергетических состояний, или энергетических уровней, на которых могут находиться электроны. Испускаемое возбужденными атомами электромагнитное либо корпускулярное излучение характеризуется набором энергий, однозначно связанным с электронной структурой атомов. Это дает возможность по полученным спектроскопическим данным идентифицировать атомы элементов, входящих в состав анализируемого вещества, — осуществить как качественный, так и количественный анализ вещества. Качественный анализ осуществляют сопоставлением полученного спектра со спектральными линиями элементов, приведенными в специальных таблицах. Количественный состав компонентов может быть определен по интенсивности спектральных линий.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. В чем преимущество измерений состава веществ, основанных на исследовании электронной структуры атомов?
2. Поясните физический смысл уравнения Шрёдингера и входящих в него величин.
3. Приведите вывод уравнения Шрёдингера для стационарных состояний.
4. Охарактеризуйте особенности решения уравнения Шрёдингера для атома водорода.
5. Дайте характеристику информации, полученной при решении уравнения Шрёдингера для атома водорода.
6. Запишите выражение для собственных значений энергии атома водорода и постройте схему энергетических уровней атома.
7. Что понимают под электронными орбиталями? Опишите характер зависимости электронных орбиталей от состояния электрона в атоме.
8. Получите выражения для частоты и длины волны электромагнитного излучения, испускаемого атомом водорода.
9. Охарактеризуйте спектральные серии водорода.
10. Запишите набор значений, которые могут принимать квантовые числа для электрона в атоме. Приведите условия квантования характеристик электрона в атоме.
11. Уясните смысл главного, орбитального и магнитного орбитального квантовых чисел.

12. На основании каких экспериментально установленных фактов введена концепция спина электрона? Каков физический смысл спина? Запишите условия квантования спина и собственного магнитного момента электрона.
13. В чем сущность принципа запрета Паули?
14. Опишите последовательность заполнения электронных оболочек в многоэлектронных атомах.
15. Каков физический смысл магнетона Бора?
16. В чем сущность спин-орбитального взаимодействия? Каков смысл полного момента электрона в атоме и его квантового числа?

2.4.2. Основы атомной оптической спектроскопии

Оптическая спектроскопия объединяет оптические методы спектрального анализа качественного и количественного состава веществ. Эмиссионный спектральный анализ производят по спектрам испускания, абсорбционный – по спектрам поглощения. В атомной спектроскопии по спектрам испускания или поглощения атомов или ионов определяют элементный состав вещества. В молекулярной спектроскопии по молекулярным спектрам поглощения, люминесценции и комбинационного рассеяния света определяется молекулярный состав исследуемого вещества.

Рассмотрим основы измерений состава веществ методом атомной спектроскопии в оптическом диапазоне.

В эмиссионном атомном спектральном анализе исследуемое вещество переводят в атомарное состояние, осуществляют возбуждение атомов, разложение испускаемого излучения в спектр, регистрацию спектра и последующую его обработку. Перевод анализируемого вещества в атомарное состояние и сообщение атомам дополнительной энергии осуществляют путем испарения твердых и жидких проб и возбуждения в этих парах газового разряда. Испускаемое возбужденными в разрядном промежутке атомами излучение разлагается в спектр. Атомные спектры имеют линейчатую структуру, т. е. состоят из отдельных спектральных линий. Для получения и регистрации спектра используются соответствующие спектральные приборы и приемники оптического излучения, описание принципов действия которых изложено в подразд. 2.2.3.

В атомно-абсорбционном спектральном анализе анализируемое вещество также переводят в парообразное атомарное состояние (в пламени или плазме газового разряда). На исследуемое вещество направляется свет от источников либо сплошного, либо дискретного излучения. В случае сплошного излучения при его прохождении через пробу вещества поглощается излучение с частотами, соответствующими пере-

ходам атомов в возбужденные состояния. Получаемый при этом спектр аналогичен спектру испускания с той разницей, что на частотах спектральных линий эмиссионного спектра наблюдаются темные линии поглощения. По таким спектральным линиям можно определить качественно элементный состав вещества. В случае дискретного излучения свет, проходя через пар исследуемого вещества, ослабляется, и по степени ослабления интенсивности спектральных линий определяемого элемента можно установить его концентрацию в пробе.

Ширина атомных энергетических уровней и естественная ширина спектральных линий. Атом обладает определенным набором энергетических состояний, или энергетических уровней, на которых могут находиться электроны и между которыми могут осуществляться электронные переходы. Однако определенное состояние электрона в атоме не является строго стационарным. Вследствие этого имеется неопределенность энергии электрона в атоме, находящегося в определенном состоянии, и соответствующее размытие энергетического уровня. Такое уширение уровня зависит от средней длительности пребывания атома в данном состоянии – времени жизни τ_i электрона на этом уровне, и характеризуется шириной уровня ΔE_i . Ширина атомного уровня очень мала по сравнению с энергией электрона на этом уровне. В соответствии с соотношением неопределенностей для энергии и времени

$$\Delta E_i \approx \frac{\hbar}{\tau_i}. \quad (2.110)$$

Ширина энергетических уровней определяет естественную ширину спектральных линий, излучаемых атомами. Естественная ширина спектральных линий – это минимальный интервал частот ν или длин волн λ , характеризующий спектральные линии в оптических спектрах атомов. Каждому излучательному квантовому переходу между дискретными уровнями энергии соответствует некоторый интервал $\Delta \nu_{ij}$ частот, близких к частоте перехода, определяемой соотношением (2.95). Значение $\Delta \nu_{ij}$ характеризует ширину спектральной линии, или степень ее монохроматичности. Естественная ширина спектральной линии определяется суммой ширин энергетических уровней E_j и E_i :

$$\Delta \nu_{ij} = \frac{\Delta E_j + \Delta E_i}{h} \approx \frac{1/\tau_j + 1/\tau_i}{2\pi}, \quad (2.111)$$

т. е. $\Delta \nu_{ij}$ тем больше, чем меньше времена жизни электронов на уровнях n_i и n_j .

Профиль спектральной линии (зависимость ее интенсивности от частоты или длины волны) обычно имеет максимум при частоте перехода ν_{ij}

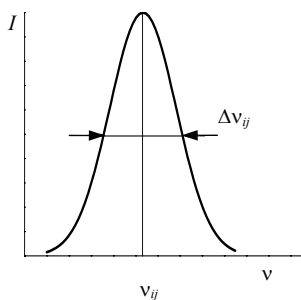


Рис. 2.51. Распределение интенсивности спектральной линии

или вблизи нее (рис. 2.51). За ширину спектральной линии $\Delta\nu_{ij}$ принимают разность частот, которым соответствует уменьшение интенсивности по сравнению с максимальной вдвое (ее называют полушириной спектральной линии).

Естественная ширина спектральной линии есть фундаментальная величина, определяемая процессами, происходящими в атоме, и является минимальной энергетической шириной, которая могла бы наблюдаться детектором с высоким разрешением. При экспериментальном получении спектров к естественной ширине спектральных

линий добавляется их уширение вследствие хаотического теплового движения атомов и других воздействий, а также инструментальная ширина, зависящая от используемого спектрометрического оборудования.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Определите предмет оптической спектроскопии и охарактеризуйте методы ее реализации.
2. Какими процессами обусловлена естественная ширина атомных энергетических уровней?
3. Как определяется естественная ширина спектральных линий?

2.4.3. Многоэлектронные атомы. Мультиплетность энергетических уровней атомов и атомных спектров

Спектры щелочных металлов. Дублетная структура спектров.

В подразд. 2.4.1 рассмотрены электронная структура и спектр излучения одноэлектронного атома водорода. В оптических спектрах многоэлектронных атомов имеют место дополнительные особенности, проявления которых рассмотрим на примере атомов щелочных металлов.

На рис. 2.52 представлена схема энергетических уровней атома лития и соответствующих электронных переходов. Литий, как и другие щелочные металлы, одновалентен. Валентный электрон атома щелочного металла находится в эффективном поле, создаваемом ядром и первыми $Z - 1$ электронами. Потенциальная энергия электрона в этом поле несколько отличается от кулоновской, характерной для атома водорода. По этой причине энергия электрона в атоме зависит не только от главного квантового числа n , но и от орбитального квантового числа l . Уровни энергии, соответствующие одному и тому же главному квантовому числу, но имеющие различные орбитальные числа, не совпадают.

В атоме лития самым низким уровнем энергии валентного электрона является $2s$ -состояние ($n = 2, l = 0$), поскольку $1s$ -состояние занято двумя электронами, образующими остов атома. Ближайшим по энергии возбужденным состоянием атома является $2p$ -состояние ($n = 2, l = 1$). При $n = 3$ имеются близкие, но различающиеся по энергиям $3s$ -, $3p$ -, $3d$ - и другие состояния. Схема уровней других щелочных металлов имеет аналогичную структуру.

Излучение электромагнитной энергии оптического диапазона происходит в результате перехода внешнего валентного электрона атома с одного энергетического уровня на другой. Поэтому валентные электроны атомов называют оптическими.

Однако не все электронные переходы сопровождаются испусканием кванта электромагнитного излучения. Возможными излучательными переходами являются те, которые разрешены правилами отбора: главное квантовое число может изменяться на любое значение, а орбитальное квантовое число – лишь на единицу:

$$\Delta n - \text{любое число; } \Delta l = \pm 1. \quad (2.112)$$

Это означает, что возможны излучательные переходы лишь между соседними по l уровнями, т. е. между p - и s -состояниями, между d - и p -состояниями, между f - и d -состояниями и т. д.

В соответствии с распределением Больцмана можно заключить, что наибольшее число атомов находится в энергетическом состоянии с минимальной энергией. У атома лития оптический электрон при этом находится в $2s$ -состоянии. Большинство возбужденных атомов находятся в $2p$ -состояниях. Поэтому спектральная линия излучения, получаемая за счет перехода электронов в атомах лития из $2p$ - в $2s$ -состояние, является наиболее интенсивной и называется резонансной.

Поскольку при переходах главное квантовое число n может изменяться на любое значение, то в $2s$ -состояние возможны переходы из любых p -состояний. В результате этих переходов возникает серия спектральных линий, называемая главной серией. В спектре атома лития

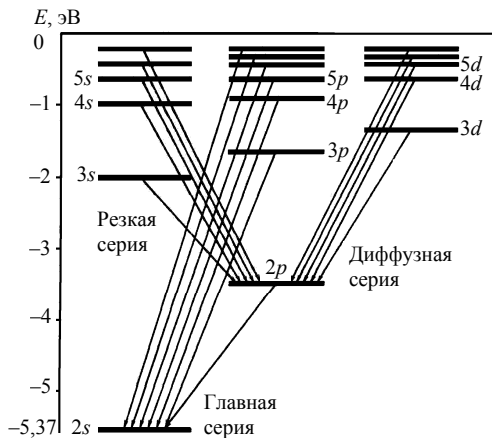


Рис. 2.52. Схема энергетических уровней и электронных переходов атома лития

кроме главной имеются и другие серии. В частности, за счет электронных переходов в $2p$ -состояние из d -состояний формируется первая побочная (или диффузная) серия. Серия называется диффузной из-за нерезкости (размытости) ее спектральных линий. За счет переходов в $2p$ -состояние из более энергетичных s -состояний формируется вторая побочная (или резкая) серия (см. рис. 2.52). Следующая серия, получающаяся в результате переходов электрона из f -состояний в $3d$ -состояние, лежит в инфракрасной части спектра. Спектры других щелочных металлов имеют аналогичную структуру.

При анализе спектров щелочных металлов с применением спектроскопических приборов с высокой разрешающей способностью обнаружено, что каждая из линий излучения в действительности расщеплена на две линии, т. е. является дублетом. Причем у линий главной серии расщепление не является постоянным, а изменяется от линии к линии, а у всех линий диффузной и резкой серий расщепление одинаково. Наличие расщепления линий показывает, что энергия уровней зависит не только от главного и орбитального квантовых чисел, но и от некоторой дополнительной величины.

Расщепление энергетических уровней атомов на подуровни обусловлено спин-орбитальным взаимодействием, сущность которого рассмотрена в подразд. 2.4.1. Вследствие спин-орбитального взаимодействия энергетические состояния с одинаковыми значениями квантовых чисел n и l (кроме s -состояний, для которых $l = 0$), но с различными проекциями спина имеют различные значения энергии. Энергия E_{sl} спин-орбитального взаимодействия (см. формулу (2.107)) является поправкой к энергии соответствующего энергетического уровня E_n атома, и величина расщепления равна удвоенному значению E_{sl} .

Спин-орбитальным взаимодействием легко объясняется дублетная структура спектров спектральных линий щелочных металлов (рис. 2.53). В обозначениях энергетических уровней дополнительно использованы значения квантового числа j полного момента электрона в атоме. Например, состояние $3d_{5/2}$ характеризуется следующим набором квантовых чисел: $n = 3$, $l = 2$, $j = 5/2$, $m_s = +1/2$. Для нерасщепляющихся s -состояний принимается $j = 1/2$.

В главной серии (рис. 2.53, а) переходы с близких по энергиям p -уровней на один и тот же $2s$ -уровень дают по две близко расположенные линии излучения, т. е. дублет. Причем расщепление различных p -уровней неодинаково. Резкая серия получается в результате переходов электрона с s -уровней на $2p$ -подуровни (рис. 2.53, б). В этом случае расщепление линий серии одно и то же, поскольку у всех линий оно обусловлено расщеплением одного и того же $2p$ -уровня. Спектральные

линии в каждом из дублетов являются резкими. Диффузная серия получается в результате электронных переходов с расщепленных d -уровней на $2p$ -подуровни (рис. 2.53, в). Причем расщепление d -уровней много меньше, чем расщепление $2p$ -уровня. Фактически при переходах с d -уровней на $2p$ -подуровни испускаются кванты трех энергий, поскольку переход, изображенный штриховой линией, запрещен правилами отбора по квантовому числу j :

$$\Delta j = 0; \pm 1. \quad (2.113)$$

Однако две линии, получающиеся при переходе с двух d -подуровней на один и тот же $2p$ -подуровень, расположены по частоте очень близко друг к другу и практически сливаются. В результате они воспринимаются как одна размытая линия. Энергетическое расстояние между этой парой линий и одиночной линией существенно, и в целом эти три линии воспринимаются как дублет из размытых линий. Дублетное расщепление определяется расщеплением одного и того же уровня $2p$ и поэтому одинаково для всей диффузной серии.

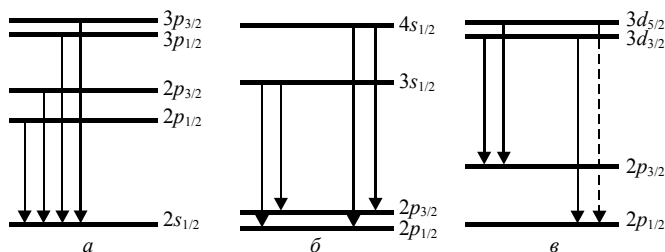


Рис. 2.53. Схемы электронных переходов в атоме лития, поясняющие тонкую структуру спектральных линий: a – главной серии; $б$ – резкой серии; $в$ – диффузной серии

Мультиплетность энергетических уровней атомов и атомных спектров. У более сложных атомов спин-орбитальное взаимодействие приводит к мультиплетному расщеплению энергетических уровней, которые могут занимать оптические электроны, и, соответственно, к мультиплетности спектральных линий. Для определения мультиплетности необходимо учитывать полные моменты атома как целого. Спины всех электронов, входящих в состав атома, связываются между собой и образуют полный спин атома, а орбитальные моменты всех электронов – полный орбитальный момент атома. Спин-орбитальное взаимодействие в атоме определяется взаимодействием полного спинового момента, полного орбитального момента атома и их объединением в полный момент импульса атома. Мультиплетность определяется числом различных

способов образования полного момента атома при данных значениях полного спина и полного орбитального момента атома. Доказано, что мультиплетность расщепления энергетических уровней оптических электронов атома

$$N_{SL} = 2S + 1, \quad (2.114)$$

где S – полный спин атома.

Спин-орбитальное взаимодействие дает вклад в изменение энергии атома, что приводит к расщеплению соответствующего энергетического уровня на подуровни, обуславливая мультиплетную структуру энергетических уровней и соответствующую тонкую структуру спектральных линий.

Для атомов одновалентных щелочных металлов с одним оптическим электроном наблюдаются спектральные дублеты, поскольку спин атома $S = 1/2$ и мультиплетность $N_{SL} = 2$. Более сложным атомам присущи более высокие мультиплетности.

Двухвалентные атомы (He, Be, Mg, Ca и др.) имеют по два оптических электрона. Полный момент атома обусловлен спинами и орбитальными моментами этих двух электронов, поскольку спины и орбитальные моменты остальных δ стоновых электронов взаимно скомпенсированы. Следовательно, полный спин S двухвалентного атома может принимать значения либо 0, либо 1. Соответственно, по формуле (2.114) получим: при $S = 0$ мультиплетность $N_{SL} = 1$ – энергетические уровни синглетны; при $S = 1$ $N_{SL} = 3$ – уровни триплетны. В природе имеется два вида атомов гелия и щелочноземельных металлов: атомы, энергетические уровни которых синглетны, и атомы, у которых они триплетны. У гелия это парагелий и ортогелий. У атома парагелия спины двух электронов антипараллельны ($m_s = 1/2$ и $m_s = -1/2$; $S = 0$), его энергетические уровни синглетны. У атома ортогелия спины электронов параллельны ($S = 1$) и энергетические уровни триплетны.

На рис. 2.54 приведены схемы энергетических уровней атомов парагелия и ортогелия. В основном состоянии атома парагелия его электроны находятся в $1s$ -состояниях. Спектр парагелия образуется в результате переходов из возбужденного состояния между синглетными уровнями и состоит из синглетных линий. Переходы из p -состояний в $1s$ -состояния дают линии главной серии парагелия, а переходы из p -состояний в $2s$ -состояния образуют вторую главную серию. Минимальной энергии оптического электрона в атоме ортогелия соответствует $2s$ -состояние. Поскольку, в соответствии с принципом Паули, в $1s$ -состоянии не может быть двух электронов с параллельными спинами, то один из двух электронов невозбужденного атома находится в $2s$ -состоянии. Спектр ортогелия получается в результате переходов между триплетными уровнями и существенно отличается от спектра парагелия.

Трехвалентные атомы с тремя оптическими электронами (В, Al и др.) могут иметь два значения полного спина: $S = 1/2$ и $S = 3/2$. При $S = 1/2$ мультиплетность $N_{SL} = 2$ – энергетические уровни дублетны; при $S = 3/2$ $N_{SL} = 4$ – энергетические уровни представляют собой квартеты.

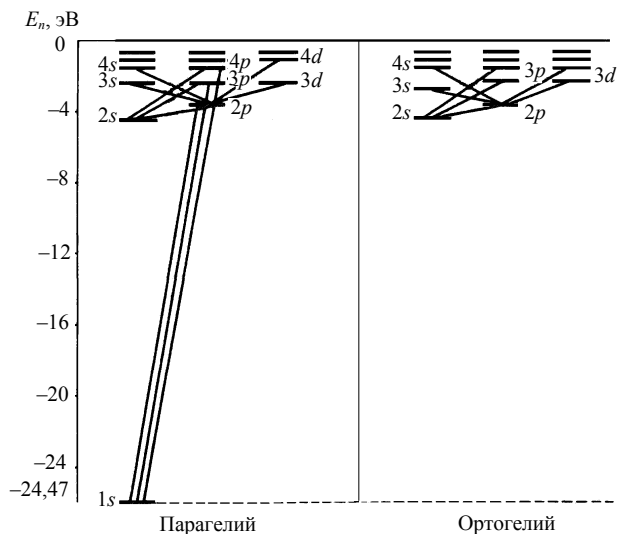


Рис. 2.54. Схемы энергетических уровней атомов парагелия и ортогелия

На основании (2.114) сформулировано правило мультиплетностей: атомы или ионы с четным числом оптических электронов имеют нечетные мультиплетности; атомы или ионы с нечетным числом электронов имеют четные мультиплетности.

Мультиплетность энергетических уровней электронов в атомах характерна для оптических электронов. Проявляется мультиплетность в оптических спектрах излучения в виде тонкой структуры спектров. Спектральные линии определяются набором энергетических уровней и подуровней, между которыми возможны электронные переходы, с учетом правил отбора.

Имеющиеся в атоме основные электроны связаны с ядром более сильно, чем оптические, и не участвуют в оптических переходах. Для основных электронов характерно дублетное расщепление энергетических уровней вследствие спин-орбитального взаимодействия. Дублетная структура энергетических уровней основных электронов в атомах элементов обнаруживается в рентгеновских спектрах, рентгеновских фотоэлектронных и оже-электронных спектрах.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Приведите схему энергетических уровней и электронных переходов атома лития. Охарактеризуйте спектральные серии излучения лития.
2. Какие электроны атома являются оптическими? Сформулируйте правила отбора. Поясните их смысл.
3. Поясните дублетную структуру спектральных линий атомов щелочных металлов.
4. В чем особенности проявления спин-орбитального взаимодействия в атомах с несколькими оптическими электронами?
5. Как определяется мультиплетность расщепления энергетических уровней оптических электронов? Сформулируйте правило мультиплетностей.
6. Поясните схемы энергетических уровней атомов парагелия и ортогелия.

2.4.4. Взаимодействие атомов с электромагнитным полем. Расщепление энергетических уровней атомов и магнитный резонанс

Электронная структура атомов вещества может изменяться и при внешнем электромагнитном воздействии, т. е. при помещении вещества во внешнее электрическое либо магнитное поле. Наблюдаемые при этом эффекты являются источниками дополнительной информации о строении сложных атомов; учет этих эффектов существенно облегчает истолкование оптических спектров сложных атомов. При воздействии внешних полей происходит дополнительное расщепление энергетических уровней атомов на подуровни, что отражается на структуре атомных спектров. Имеет также место избирательное поглощение энергии переменного электромагнитного поля атомами вещества, находящегося в постоянном магнитном поле, – магнитный резонанс.

Эффект Зеемана. Во внешнем постоянном магнитном поле проявляется эффект Зеемана – расщепление энергетических уровней атомов и, соответственно, спектральных линий электромагнитного излучения, испускаемого атомами, под воздействием магнитного поля. В магнитном поле энергетические уровни атомов расщепляются на зеемановские подуровни. При этом имеет место взаимодействие между магнитным моментом атома и внешним магнитным полем. Если полный момент атома равен J , то число возможных ориентаций магнитного момента атома относительно внешнего магнитного поля равно $2J + 1$. Каждой ориентации полного момента соответствует своя энергия взаимодействия. Следовательно, энергетический уровень атома в состоянии с полным моментом J при помещении атома в магнитное поле расщепляется на $2J + 1$ подуровней.

Если энергия взаимодействия магнитного момента атома с внешним магнитным полем меньше энергии спин-орбитального взаимодействия, то магнитное поле считается слабым. В слабом поле зеемановское расщепление на $2J + 1$ подуровней имеет меньшую величину, чем естественное мультиплетное расщепление, обусловленное спин-орбитальным взаимодействием. Эффект Зеемана при этом называют сложным или аномальным.

Полная энергия атома во внешнем магнитном поле

$$E = E^{(0)} - \mu_{J_z} B = E^{(0)} - g_J \mu_B m_J B, \quad (2.115)$$

где $E^{(0)}$ – внутренняя энергия атома в отсутствии внешнего поля; $-\mu_{J_z} B$ – энергия взаимодействия полного момента атома с магнитным полем; μ_{J_z} – проекция полного момента атома на направление магнитного поля; B – индукция внешнего магнитного поля; g_J – множитель Ланде; μ_B – магнетон Бора; m_J – магнитное квантовое число полного момента.

Множитель Ланде (фактор магнитного расщепления, g -фактор) определяет масштаб расщепления энергетических уровней в магнитном поле в единицах магнетона Бора μ_B . Для разных энергетических уровней атома значения множителя Ланде различны и зависят от того, как складываются орбитальные и спиновые моменты отдельных электронов атома. Множитель Ланде определяется соотношением

$$g_J = \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}, \quad (2.116)$$

где L – полный орбитальный момент; S – полный спиновый момент; J – полный момент атома ($J = L + S$). Для чисто орбитального момента ($S = 0, J = L$) $g = 1$, для чисто спинного момента ($L = 0, J = S$) $g = 2$.

Расщепление энергетических уровней атомов в слабом магнитном поле осуществляется в соответствии с выражением (2.115) на величину

$$\Delta E = g_J \mu_B m_J B. \quad (2.117)$$

Рассмотрим зеемановское расщепление энергетических уровней в слабом магнитном поле на примере атома натрия, имеющего один оптический электрон, основное состояние которого $3s$ (рис. 2.55).

Энергетический уровень $3p_{3/2}$ с полным моментом $J = 3/2$ расщепляется на четыре подуровня, соответствующие четырем возможным ориентациям полного момента относительно магнитного поля (магнитное квантовое число полного момента $m_J = -3/2, -1/2, 1/2, 3/2$). Полный момент $J = L + S$, где L – полный орбитальный момент; S – полный спин. При $J = 3/2$ число возможных ориентаций полного момента $2J + 1 = 4$.

Энергетические уровни $3p_{1/2}$ и $3s_{1/2}$ с полным моментом $J = 1/2$ расщепляются на два подуровня каждый, которые соответствуют двум возможным

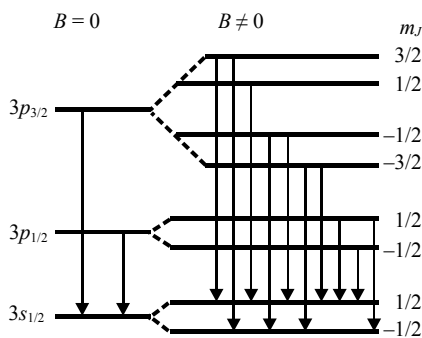


Рис. 2.55. Схема расщепления энергетических уровней атома натрия в слабом магнитном поле и соответствующих электронных переходов

ориентациям полного момента относительно вектора \mathbf{B} индукции магнитного поля ($m_J = -1/2, 1/2$).

На рис. 2.55 также приведены возможные излучательные переходы. В отсутствии магнитного поля ($\mathbf{B} = 0$) наблюдается спектральный дублет главной серии в излучении натрия. Зеемановское расщепление уровней на подуровни приводит к расщеплению этого дублета (а также каждого дублета главной серии) на десять спектральных линий. С применением спектральных приборов высокого разрешения будет наблюдаться соответствующая тонкая структура спектра. При определении излучательных переходов между зеемановскими подуровнями принимаются во внимание правила отбора:

$$\Delta L = \pm 1; \quad \Delta J = 0, \pm 1; \quad \Delta m_J = 0, \pm 1; \quad \Delta S = 0. \quad (2.118)$$

Если энергия взаимодействия магнитного момента атома с внешним магнитным полем превышает энергию спин-орбитального взаимодействия, то поле считают сильным. В сильном магнитном поле связь между орбитальным моментом и спиновым магнитным моментом в атоме разрывается, и каждый из них отдельно взаимодействует с магнитным полем. Явление разрыва спин-орбитальной связи под действием внешнего магнитного поля называется эффектом Пашена – Бака. В сильном поле наблюдается простой, или нормальный, эффект Зеемана.

Зеемановское расщепление энергетических уровней в сильном магнитном поле также рассмотрим на примере атома натрия (рис. 2.56). Из-за разрыва спин-орбитальной связи нельзя говорить о полном моменте атома. В этом случае (сравните с (2.115)) полная энергия атома в магнитном поле

$$E = E^{(0)} - \mu_{L_z} B - \mu_{S_z} B, \quad (2.119)$$

где $(-\mu_{L_z} B - \mu_{S_z} B)$ – сумма энергий взаимодействия с магнитным полем орбитального и спинового моментов атома соответственно.

В левой части рис. 2.56 показана схема расщепления в магнитном поле $3p$ -уровня по орбитальному моменту электрона и магнитному квантовому числу m_l (s -уровень не расщепляется). При каждой ориентировке орбитального магнитного момента спиновый магнитный момент может независимо ориентироваться двумя способами. Поэтому каждый из трех орбитальных подуровней расщепляется на два спиновых подуровня. В результате $3p$ -уровень расщепляется на шесть подуровней. Расщепление $3s$ -уровня происходит лишь вследствие ориентировки спинового магнитного момента на два подуровня.

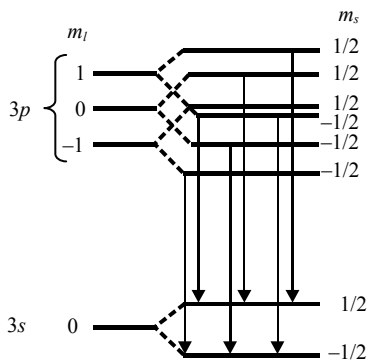


Рис. 2.56. Схема расщепления энергетических уровней и электронных переходов в главной серии излучения атома натрия в сильном магнитном поле

Анализируя возможные разрешенные правилами отбора (2.118) излучательные переходы (рис. 2.56), можно заключить, что в главной серии атома натрия излучается шесть спектральных линий. Поскольку расщепление, обусловленное ориентировкой во внешнем магнитном поле проекции спина, одинаковое как в p -, так и в s -состояниях, то эти шесть линий попарно сливаются в три и в спектре излучения наблюдается триплет.

Таким образом, при увеличении индукции внешнего магнитного поля аномальный (сложный) эффект Зеемана в результате эффекта Пашена – Бака переходит в нормальный (простой).

Эффект Штарка. При помещении атома во внешнее электрическое поле также наблюдается расщепление спектральных линий атомов – эффект Штарка. Атом, находясь в состоянии с определенной энергией E_n , во внешнем электрическом поле напряженностью E , направленной по оси z , получает дополнительную энергию ΔE_n вследствие поляризуемости его электронной оболочки и приобретения дипольного момента. Энергетический уровень, которому соответствует одно возможное состояние атома (невырожденный уровень), в электрическом поле характеризуется энергией $E_n + \Delta E_n$, т. е. смещается. Если же энергетический уровень вырожден, то каждое из его состояний приобретает разную дополнительную энергию. В результате вырожденный уровень расщепляется на штарковские подуровни, число которых равно числу различных значений добавок к энергии или кратности вырождения.

Итак, во внешних электрическом и магнитном полях снимается вырождение энергетических уровней атомов. Вырождение означает, что

атом имеет определенное значение энергии, но при этом может находиться в нескольких различных состояниях. Число таких состояний, которому отвечает одно и то же значение энергии, называют кратностью вырождения. При действии внешнего поля на атом совпадавшие до этого значения энергии атома становятся различными. Происходит расщепление уровней, или снятие вырождения.

Магнитный резонанс. Расщепление энергетических уровней атомов в магнитном поле, обусловленное наличием собственного магнитного момента у электронов, приводит к избирательному поглощению энергии переменного электромагнитного поля – электронному магнитному резонансу. Это явление связано с вынужденными переходами между подуровнями одного и того же зеемановского мультиплета и лежит в основе ряда современных методов измерения состава и исследования свойств веществ.

Одним из проявлений магнитного резонанса является электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), наблюдаемый в веществах, содержащих парамагнитные частицы. Объектами исследований методом ЭПР могут быть атомы (например, H, N) и молекулы (например, NO) с нечетным числом электронов, свободные радикалы химических соединений с неспаренными электронами (например, CH₃), ионы с частично заполненными электронными оболочками (например, ионы переходных металлов), электроны проводимости в металлах и полупроводниках. Метод ЭПР широко применяется в химии и биологии для анализа свободных радикалов в металлорганических соединениях и биологических системах.

В постоянном магнитном поле энергетические уровни парамагнитной частицы расщепляются на подуровни в соответствии с эффектом Зеемана (см. рис. 2.55, 2.56). Если в дополнение к постоянному магнитному полю на исследуемое вещество наложить переменное высокочастотное магнитное поле, то возможно возбуждение электронных переходов между зеемановскими подуровнями. Такие переходы могут происходить, если переменное магнитное поле, индукция которого изменяется во времени по закону $B = B_m \cos 2\pi\nu t$, перпендикулярно постоянному и выполняется условие резонанса:

$$\Delta E = h\nu \quad (2.120)$$

или, с учетом (2.117), при значении индукции магнитного поля, удовлетворяющем условию

$$B_0 = \frac{h\nu}{g_J \mu_B m_J}. \quad (2.121)$$

Переменное электромагнитное поле с одинаковой вероятностью вызывает электронные переходы как с нижних подуровней на верхние (сопровождающиеся поглощением энергии), так и обратные переходы (сопровождающиеся излучением энергии). Поскольку населенность нижних подуровней выше, чем более высокоэнергетичных, то преобладают переходы с поглощением электромагнитной энергии. При переходе электрона с одного подуровня на другой меняется проекция спина электрона.

Для измерений методом ЭПР используются радиоспектрометры. На рис. 2.57 приведена схема спектрометра ЭПР. Образец 11 исследуемого вещества помещается в объемный резонатор 4, который размещен между полюсными наконечниками 5 и 12 электромагнита, создающего постоянное магнитное поле. Значение индукции магнитного поля можно медленно изменять. Высокочастотное электромагнитное излучение от источника 1 (генератора магнетронного типа) подается в резонатор по волноводу 13. Затвор 2 и аттенуатор 3 предназначены для перекрывания и регулировки интенсивности СВЧ излучения. Прошедшее через резонатор с помещенным в него образцом (или отраженное от него) электромагнитное излучение попадает на детектор 7. При этом частота ν переменного электромагнитного поля поддерживается постоянной, а индукция магнитного поля медленно изменяется, вызывая плавное изменение величины интервала ΔE зеемановского расщепления энергетических уровней. При определенных значениях ΔE выполняется условие резонанса (2.120).

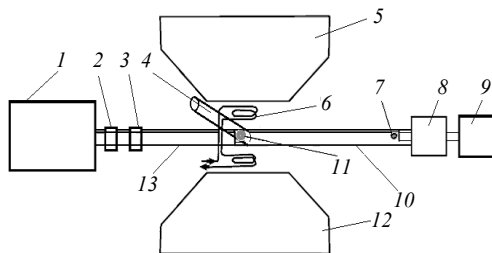


Рис. 2.57. Схема радиоспектрометра (спектрометра ЭПР):

- 1 – источник СВЧ излучения магнетронного типа; 2 – затвор; 3 – аттенуатор;
4 – объемный резонатор; 5, 12 – полюсные наконечники электромагнита;
6 – катушка индуктивности; 7 – детектор; 8 – усилитель;
9 – регистрирующее устройство; 10, 13 – волноводы; 11 – исследуемый образец

Регистрируется изменение мощности высокочастотного излучения при его резонансном поглощении исследуемым веществом в зависимости от напряженности магнитного поля. В качестве усилителя сигнала

используется приемно-усилительная система на основе лампы бегущей волны магнетронного типа (см. подразд. 2.2.3, рис. 2.17). катушка индуктивности b служит для модуляции сигнала ЭПР высокочастотным переменным магнитным полем, в результате которого происходит его дифференцирование по напряженности магнитного поля. Регистрируемый сигнал представляет собой первую производную от линии поглощения. Площадь под линией поглощения пропорциональна концентрации парамагнитных частиц в образце. Для определения концентрации измеряют площади под кривой поглощения у эталонного образца с известной концентрацией парамагнитных центров и у измеряемого образца; неизвестную концентрацию находят из пропорции при условии, что оба образца имеют одинаковую форму и объем. Если два сигнала имеют одинаковую ширину ΔH , то концентрации парамагнитных центров соотносятся как амплитуды сигналов.

Для свободного электрона спин $S = 1/2$ и проекция магнитного момента $\mu_{S_z} = g_s \mu_B m_s$, где $g_s = 2,0023$ (g -фактор свободного электрона). В магнитном поле энергия электрона может принимать два значения: $E = \pm 1/2 g_s \mu_B B$, и величина поглощаемой электроном энергии переменного электромагнитного поля $h\nu = g_s \mu_B B$.

Для частиц, содержащих несколько электронов, полный спин S может принимать любое кратное $1/2$ значение, а энергия – $(2S + 1)$ значение. Величина g -фактора определяется суммарным значением спинового и орбитального моментов импульса (см. (2.116)), и может в несколько раз отличаться от g_s .

Если резонансное поглощение электромагнитной энергии осуществляется ядрами атомов при изменении проекции спинов ядер под действием внешнего магнитного поля, то магнитный резонанс называется ядерным. Резонансные частоты ядерного магнитного резонанса (ЯМР) попадают в диапазон коротких радиоволн (10^6 – 10^7 Гц), а ЭПР – в диапазон СВЧ излучения (10^9 – 10^{10} Гц).

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. В чем состоит сущность эффекта Зеемана?
2. Определите критерии слабого и сильного магнитных полей в эффекте Зеемана.
3. Каков физический смысл множителя Ландé?
4. Опишите схему расщепления энергетических уровней атомов натрия при сложном эффекте Зеемана.
5. Поясните суть эффекта Пашена – Бака.

6. Опишите схему расщепления энергетических уровней атомов натрия при простом эффекте Зеемана.
7. Поясните суть эффекта Штарка.
8. Поясните смысл вырождения энергетических уровней атомов и снятия вырождения.
9. Что понимают под магнитным резонансом?
10. Поясните сущность измерений методом ЭПР. Проанализируйте процесс измерения методом ЭПР на основе обобщенной функциональной схемы измерений (рис. 2.1).

2.4.5. Характеристическое рентгеновское излучение. Рентгеновский спектральный микроанализ

Характеристическое рентгеновское излучение. Для возбуждения рентгеновского излучения, имеющего дискретный спектр, необходимо образовать вакансии на внутренних электронных оболочках атомов. Ускоренный электрон, падающий на антикатод (анод) рентгеновской трубки (см. п. 2.2.2.2), сталкиваясь с атомами материала антикатада, может выбить электрон с одной из внутренних оболочек атома и образовать электронную вакансию. При переходе более высокоэнергетических электронов атомов материала антикатада на эти вакансии испускаются кванты электромагнитного излучения, энергии которых зависят от природы атомов, — характеристическое рентгеновское излучение.

Спектральные линии рентгеновского излучения данного элемента образуют серии. Излучательные переходы подчиняются правилам отбора. При переходе электронов на вакансии K -оболочки испускается излучение K -серии, на вакансии L -оболочки — излучение L -серии и т. д. (рис. 2.58). Число серий растет с увеличением порядкового номера элемента. В методах измерений состава веществ используются, главным образом, наиболее интенсивные линии K - и L -серий. В отличие от оптических рентгеновские спектры

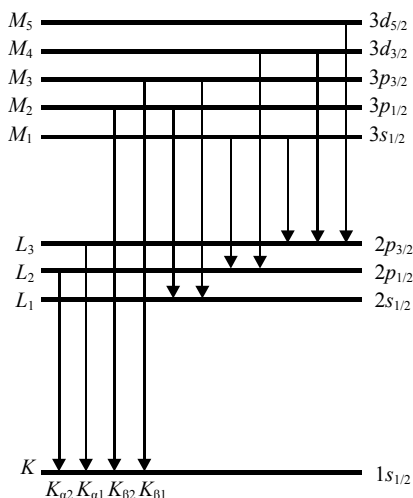


Рис. 2.58. Схема энергетических уровней основных электронов атома и соответствующих рентгеновских переходов

различных элементов имеют одинаковую структуру, поскольку внутренние оболочки атомов тяжелых элементов имеют одинаковое строение. В то же время, набор энергий квантов рентгеновского излучения различных элементов различен, является характерным для каждого элемента. Вследствие расщепления энергетических уровней атомов, обу-

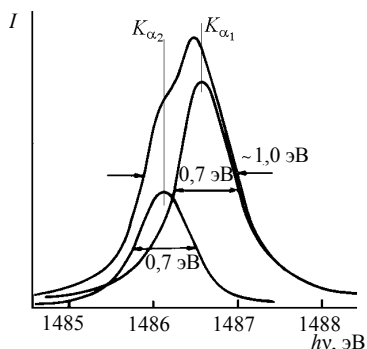


Рис. 2.59. Распределение интенсивности спектральных линий дублета K_{α} -серии излучения атомов алюминия по энергии

словленного спин-орбитальным взаимодействием, рентгеновские спектры имеют дублетную структуру. Распределение интенсивности спектрального дублета K_{α} -серии излучения атомов алюминия представлено на рис. 2.59. Интенсивность $K_{\alpha 1}$ -линии всегда больше интенсивности $K_{\alpha 2}$ -линии. Ширина каждой из линий дублета связана с временем τ жизни возбужденного состояния атома (см. формулу (2.111)).

В прил. 7 приведены приближенные значения энергии квантов K_{α} -излучения и достаточно точные значения длин волн рентгеновских

спектральных $K_{\alpha 1}$ - и $K_{\alpha 2}$ -линий атомов элементов. Для легких атомов до магния включительно расщепление спектрального дублета K_{α} -серии мало и линии спектра практически неразличимы.

Рентгеновский спектральный микроанализ. Регистрация и спектрометрия характеристического излучения, испускаемого атомами исследуемых веществ, лежат в основе рентгеновского спектрального микроанализа (рентгеновского эмиссионного анализа). Возбуждение излучения может осуществляться потоками корпускулярного излучения — ускоренными электронами или ионами, а также электромагнитным излучением.

При электронном возбуждении энергия электронов, направляемых на исследуемый материал, как и на анод рентгеновской трубки, составляет десятки килоэлектронвольт. Образование вакансий на внутренних электронных оболочках атома вызывается зависящим от времени электрическим полем, которое возникает при прохождении заряженной частицы (электрона или иона) вблизи атома.

Рассмотрим взаимодействие двух электронов: электрона, возбуждающего атом, и электрона, входящего в состав атома. Выберем систему отсчета, связанную с электроном атома. Движущийся со скоростью v электрон передает вследствие кулоновского взаимодействия электрону

атома вещества (рис. 2.60) импульс, составляющая которого в направлении, перпендикулярном скорости v ,

$$\Delta p = \frac{2e^2}{bv}, \quad (2.122)$$

где b – прицельный параметр (в общем случае расстояние между рассеивающим силовым центром и линией траектории первоначального движения рассеивающей частицы). Энергия, приобретаемая неподвижным до взаимодействия электроном,

$$\Delta T = \frac{\Delta p^2}{2m} = \frac{2e^4}{b^2 m v^2}, \quad (2.123)$$

где m и e – масса и заряд электрона

Величина, характеризующая вероятность перехода двух взаимодействующих частиц в результате их рассеяния (упругого или неупругого) в определенное конечное состояние, называется эффективным сечением взаимодействия. Полное сечение процесса взаимодействия может быть вычислено как площадь круга, радиус которого равен прицельному параметру. Из (2.123)

$$b^2 = \frac{2e^4}{\Delta T m v^2} = \frac{e^4}{\Delta T E_k},$$

где $m v^2 / 2 = E_k$ – кинетическая энергия движущегося электрона. Если принять энергию ΔT , равной энергии связи электрона в атоме ($\Delta T = E_B$), то сечение взаимодействия налетающего электрона и электрона, входящего в состав атома (сечение ионизации атома налетающим электроном)

$$\sigma_e = \pi b^2 = \frac{\pi e^4}{E_B E_k}. \quad (2.124)$$

Внесистемной единицей измерения сечения взаимодействия является барн (1 барн = $1 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2 = 1 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$) (см. прил. 4).

Если для ионизации атома с целью образования электронной вакансии на внутренней оболочке применять облучение ионами, то сечение ионизации будет определяться соотношением

$$\sigma_i = \frac{Z_1^2 M_1}{m} \frac{\pi e^4}{E_B E_k}, \quad (2.125)$$

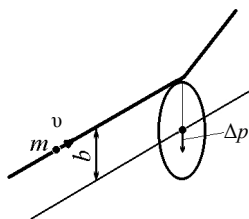


Рис. 2.60. Схема взаимодействия движущегося электрона с электроном, входящим в состав атома

где $Z_1 e$ – заряд рассеивающегося иона; M_1 – масса иона; m – масса электрона; E_k – кинетическая энергия иона. Из сравнения выражений (2.124) и (2.125) следует, что для образования электронных вакансий под воздействием ионов требуется ускорение этих частиц до энергий E_k , превышающих соответствующую энергию электронов в $Z_1^2 M_1 / m$ раз. Следовательно, для возбуждения характеристического рентгеновского излучения ионами легких атомов (водорода или гелия) требуется их ускорение до энергий порядка мегаэлектронвольт.

При возбуждении характеристического излучения электронами реализуется электронно-зондовый микроанализ, особенностью которого является возможность локализации возбуждения с применением остро сфокусированного электронного пучка и сканирования пучка по поверхности. Регистрация спектра характеристического рентгеновского излучения, испускаемого атомами вещества, позволяет при сканировании получить изображение распределения атомов элементов по поверхности исследуемого материала.

Разновидностью рентгеновского спектрального микроанализа является рентгеновский флуоресцентный анализ, в котором для ионизации атомов исследуемого вещества и образования электронных вакансий применяется электромагнитное излучение. В качестве анализирующего излучения чаще всего используется рентгеновское K_α -излучение родия ($h\nu = 20,17$ кэВ), молибдена ($h\nu = 17,44$ кэВ), серебра ($h\nu = 22,11$ кэВ) (см. прил. 7), получаемое с применением рентгеновских трубок с соответствующим анодом, а также γ -излучение некоторых радиоизотопов. Метод позволяет анализировать элементы от бериллия до урана. Для улучшения результатов при определении легких элементов с порядковыми номерами $Z < 20$ (например, натрия, магния, алюминия, кремния, фосфора, серы) используется вакуумная откачка воздуха либо продувка аналитической камеры гелием. Это вызвано необходимостью избежать поглощения воздухом рентгеновских квантов с малой энергией, испускаемых легкими элементами. При регистрации тяжелых элементов ($Z > 56$) из-за малых различий между значениями энергии квантов рентгеновского излучения соседних элементов требуется применение детекторов с высоким разрешением по энергии.

В зависимости от типа используемого для регистрации рентгеновского излучения детектора анализ рентгеновских спектров осуществляют в виде распределения либо по энергии, либо по длинам волн.

Спектрометрия характеристического рентгеновского излучения с дисперсией по энергии квантов осуществляется с применением диф-

фузионно-дрейфовых полупроводниковых детекторов, принцип действия которых изложен в подразд. 2.3.3 (с. 160).

На рис. 2.61 приведен рентгеновский спектр марганца, измеренный с дисперсией по энергии квантов. На спектре отчетливо различаются спектральные линии дублета K -серии: K_α и K_β . Сами K_α - и K_β -дублеты при спектроскопии по энергии квантов не разрешаются. Полуширина спектральной линии, равная 148 эВ, является характеристикой разрешающей способности детектора.

Спектрометрия с дисперсией по длинам волн основана на дифракции рентгеновского излучения на кристаллическом анализаторе. При этом анализируемое излучение направляется на изогнутый или плоский монокристалл, расположенный на фокальной окружности Роуланда (см. рис. 2.25). Далее, на детектор (пропорциональный, сцинтилляционный, полупроводниковый) попадает только то отраженное от монокристалла рентгеновское излучение, длина волны которого удовлетворяет условию Брэгга – Вульфа (2.21). Различным длинам волн λ соответствуют различные углы рассеяния θ . Спектрометры с дисперсией по длинам волн комплектуются наборами специально выращенных монокристаллов (например, кристаллов LiF различной ориентации, InSb, Ge, а также других специализированных кристаллов).

Электронно-зондовый микроанализ реализуется с применением аналитических приборов, использующих электронные пучки, в частности растровых (сканирующих) электронных микроскопов. Эмиссия рентгеновского излучения, возбуждаемого протонами и ионами гелия, реализуется в спектрометрах Резерфордского обратного рассеяния (см. подразд. 2.5.1). Главным преимуществом применения для возбуждения рентгеновского излучения ускоренных ионов по сравнению с электронами является существенное уменьшение фона тормозного излучения, что приводит к повышению чувствительности метода измерений при исследовании ничтожно малых концентраций атомов элементов. Для реализации рентгеновского флуоресцентного анализа применяются специальные

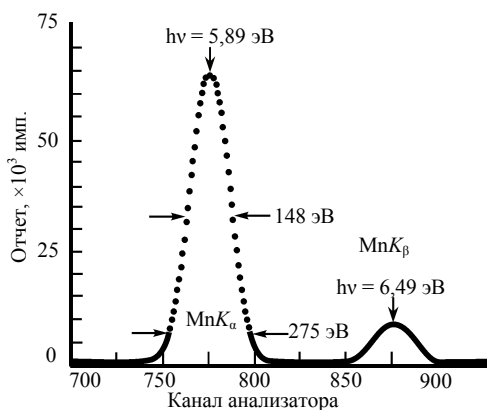


Рис. 2.61. Спектр K -серии рентгеновского излучения марганца, измеренный с дисперсией по энергии квантов

спектрометры, оборудованные, как правило, кристаллическими анализаторами с дисперсией по длинам волн.

Рентгеновский спектральный микроанализ используется для измерения элементного состава веществ (идентификации элементов и количественного анализа элементного состава), а с применением сканирования – и для анализа распределения атомов элементов по поверхности. Метод чувствителен к элементам с порядковым номером $Z \geq 10$; рентгеновский флуоресцентный анализ – к элементам с $Z \geq 5$. Уровень регистрации элементов составляет $(5-10) \cdot 10^{-7}$ ат. %, за исключением элементов с $Z \leq 12$, для которых регистрируемые концентрации составляют 0,1 ат. %.

При количественном анализе измеряется значение выхода Y_p рентгеновского излучения с данной длиной волны λ_p , вычитается фон Y_b , обусловленный тормозным излучением, и определяется отношение K_e скорректированного выхода излучения из исследуемого образца к выходу излучения из стандартного калибровочного образца:

$$K_e = \frac{Y_p - Y_b}{Y_p^s - Y_b^s}. \quad (2.126)$$

Концентрация конкретного элемента в исследуемом образце может быть определена через концентрацию этого же элемента в стандартном образце с применением соотношения

$$C_A = K_e C_A^s, \quad (2.127)$$

если исследуемый и стандартный образцы анализируются в идентичных условиях. Количественный анализ может быть выполнен с точностью около 1%.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Приведите схему энергетических уровней основных электронов атома и соответствующих рентгеновских переходов. Поясните ее.
2. Уясните механизм возбуждения характеристического рентгеновского излучения атомов.
3. Поясните схему взаимодействия двух частиц (электронов). Каков смысл величин: прицельный параметр; эффективное сечение взаимодействия?
4. Охарактеризуйте особенности спектральных серий характеристического рентгеновского излучения атомов.
5. Проанализируйте значения энергии квантов и длин волн K_α -серии характеристического рентгеновского излучения атомов различных химических элементов (прил. 7).
6. В чем сущность рентгеновского спектрального микроанализа?

7. Каковы отличительные особенности рентгеновского микроанализа при возбуждении характеристического излучения ускоренными электронами и ионами?
8. Каковы отличительные особенности методов: электронно-зондового микроанализа; рентгеновского флуоресцентного анализа?
9. Поясните принципы спектрометрии характеристического рентгеновского излучения с дисперсией по энергии квантов с применением диффузионно-дрейфовых полупроводниковых детекторов.
10. Поясните принципы спектрометрии характеристического рентгеновского излучения с дисперсией по длинам волн с применением кристаллических анализаторов.
11. Проанализируйте процесс измерения состава веществ методом рентгеновского спектрального микроанализа на основе обобщенной функциональной схемы измерений (рис. 2.1).
12. Опишите методику качественного и количественного анализа состава вещества методом рентгеновского спектрального микроанализа.

2.4.6. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

Физические основы рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФС) основан на явлении внешнего фотоэффекта – эмиссии электронов из исследуемого вещества под действием монохроматического рентгеновского излучения. При этом анализируется распределение испускаемых фотоэлектронов по энергиям их движения – фотоэлектронный спектр. Под действием рентгеновского излучения эмитируют не только свободные электроны исследуемого вещества и валентные электроны его атомов, но и электроны, находящиеся на внутренних (бóльших) энергетических уровнях. Основными процессами, лежащими в основе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, являются: поглощение кванта электромагнитного рентгеновского излучения с энергией $h\nu$; испускание фотоэлектрона, кинетическая энергия E_k которого, отсчитываемая от определенного нуля энергии, зависит от энергии связи E_B электрона в атоме исследуемого вещества.

Закон сохранения энергии, описываемый уравнением Эйнштейна для фотоэффекта, имеет в этом случае вид

$$h\nu = E_B(k) + E_k, \quad (2.128)$$

где $h\nu$ – энергия кванта возбуждающего излучения; $E_B(k)$ – энергия связи электрона на k -м энергетическом уровне атома; E_k – кинетическая энергия фотоэлектрона.

Значения энергий связи $E_B(k)$ отсчитываются от условного уровня. При фотоэмиссии из атомов газовой фазы энергии связи измеряются

по отношению к уровню вакуума. При излучении твердых тел в качестве уровня отсчета используется уровень Ферми.

На рис. 2.62 представлена схема основных энергетических уровней атома и возможных переходов электронов из этих энергетических состояний в вакуум под воздействием рентгеновских квантов достаточной энергии.

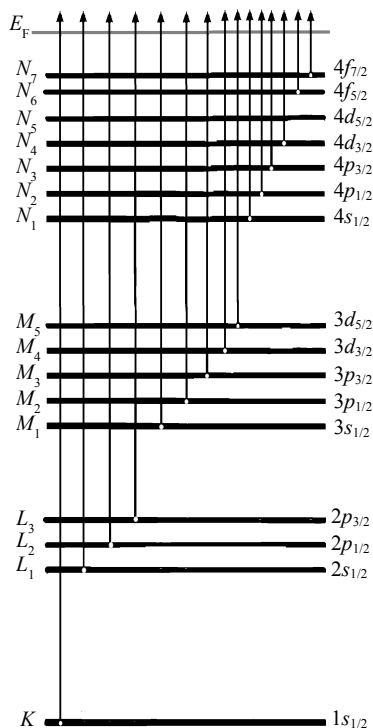


Рис. 2.62. Схема основных энергетических уровней электронов атома и возможных переходов электронов в вакуум под действием рентгеновского излучения

Энергия связи электрона в атоме определяется как разность между энергией Ферми E_F и энергией электрона на соответствующем уровне.

При исследовании диэлектриков и полупроводников образцы вследствие эмиссии электронов заряжаются. Кроме того, в этих материалах имеет место неопределенность положения уровня Ферми внутри запрещенной зоны. Эти обстоятельства указывают на то, что при получении и обработке спектров необходимо учитывать эффект зарядки.

Одним из решений проблемы является напыление на поверхность образца тонкой пленки золота (или другого металла) и использование известных атомных уровней металла для определения энергетической шкалы. При такой калибровке шкалы принимаются в качестве стандартных следующие значения энергий связи электронов в атомах металлов: $Au4f_{7/2} - 84,0$ эВ; $Ag3d_{5/2} - 368,2$ эВ; $Cu2p_{3/2} - 932,6$ эВ.

Иногда для калибровки спектров используют спектральную линию $1s$ -уровня атомов углерода, присутствующих практически всегда на реальной поверхности исследуемого образца. Энергию связи электрона на $C1s$ -уровне принимают равной $284,6$ эВ либо, при наличии на поверхности анализируемого материала углеводородных загрязнений, $284,8$ эВ. Компенсация зарядки диэлектрического образца может осуществляться облучением его низкоэнергетичными электронами.

Измерения методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии осуществляют с применением электронных спектрометров. Поток рентгеновских фотонов определенной энергии, получаемых в источнике рентгеновского излучения, выбивает внутренние электроны атомов исследуемого образца. Фотоэлектроны вводятся в энергоанализатор, и после анализа их распределения по энергиям регистрируется зависимость интенсивности выходного сигнала от кинетической энергии фотоэлектронов (фотоэлектронный спектр). Для удобства анализа часто в фотоэлектронных спектрах по оси энергий вместо кинетической энергии E_k фотоэлектронов откладываются значения энергий связи электронов E_B в атомах. При этом переход от шкалы кинетической энергии к шкале энергий связи осуществляется пересчетом в соответствии с выражением (2.128).

В качестве анализирующего излучения, возбуждающего эмиссию фотоэлектронов из атомов исследуемого вещества, обычно используется характеристическое рентгеновское K_α -излучение магния или алюминия. Из этих металлов изготовлены сменные аноды рентгеновского источника, входящего в состав спектрометра. В случае источников на магнии и алюминии около половины интенсивности рентгеновского излучения, возникающего при электронной бомбардировке, приходится на характеристическое K_α -излучение. Как показано на рис. 2.59, спектральная линия AlK_α состоит из двух компонентов, разделенных по энергии на 0,4 эВ за счет спин-орбитального расщепления $2p$ -состояния. Полная ширина линии составляет ~ 1 эВ. Для линии MgK_α -излучения может быть получено несколько лучшее разрешение ($\sim 0,8$ эВ). Характеристическое рентгеновское излучение K_α -серии магния или алюминия является практически монохроматическим. Энергия $h\nu$ возбуждающих фотоэффект фотонов, определенная по максимумам линий характеристического K_α -излучения, составляет в случае Al 1486,6 эВ, в случае Mg – 1253,6 эВ. При использовании в качестве возбуждающего фотоэффекта MgK_α - либо AlK_α -излучения из атомов вырываются электроны, энергия связи которых меньше энергии $h\nu$ квантов соответствующего излучения. Эмиссия электронов из K -оболочки возможна лишь для атомов легких элементов: от лития до магния (см. прил. 8).

Спектральные линии характеристического K_α -излучения (см. прил. 7) Cr ($h\nu = 5,41$ кэВ) и Cu ($h\nu = 8,04$ кэВ) имеют энергетическую ширину ≥ 2 эВ, а для Mo ($h\nu = 17,44$ кэВ) энергетическая ширина линии равна около 6 эВ; поэтому аноды из этих металлов не подходят для исследований с высоким разрешением без дополнительной монохроматизации.

Если же требуется более высокое, чем в случае AlK_α - и MgK_α -излучений, энергетическое разрешение, то необходимо использовать

монохроматизацию рентгеновского излучения, что, однако, приводит к соответствующему снижению эффективности возбуждения фотоэлектронов. Монохроматизация рентгеновского излучения осуществляется обычно с помощью изогнутого монокристалла кварца, расположенного по отношению к источнику излучения и образцу на окружности Роуланда (см. рис. 2.25). При этом на образце фокусируется отраженное от кристалла излучение, удовлетворяющее условию Брэгга – Вульфа (2.21). Излучение, длина волны которого не удовлетворяет соотношению (2.21), не будет попадать на образец. Для вычета фона тормозного рентгеновского излучения, попадающего на образец, используют фильтры из алюминиевой фольги.

Спектрометрия фотоэлектронов осуществляется с применением электростатических энергоанализаторов (см. подразд. 2.3.3). Используются сферические, цилиндрические и цилиндрические зеркальные энергоанализаторы (см. рис. 2.47). Эмиттируемые из атомов поверхностного слоя образца фотоэлектроны перед входом в энергоанализатор фокусируются системой электронных линз. Фотоэлектроны, достигающие выходной фокальной плоскости энергоанализатора, попадают на коллектор-детектор, который обычно представляет собой систему канальных электронных умножителей, принцип действия которых изложен в подразд. 2.2.3. Канальный умножитель выполнен в виде трубки с конусообразным входом, заполненной полупроводящим стеклом, для которого характерно высокое значение коэффициента вторичной электронной эмиссии. Вдоль трубки прикладывается сильное электрическое поле. Электроны, падающие на полупроводящее стекло, возбуждают поток вторичных электронов, которые, в свою очередь, ускоряясь электрическим полем и ударяясь о стенки трубки, вновь возбуждают вторичные электроны. В измерительной системе с таким умножителем может быть достигнут коэффициент усиления $K_y \approx 10^8$. Сформированный при этом электрический сигнал вводится в запоминающее устройство многоканального анализатора. Многоканальный анализатор сортирует и накапливает сигналы в соответствии с энергией анализируемых частиц, формируя при этом фотоэлектронный спектр. При работе в режиме счета частиц последовательность импульсов с выхода канального умножителя поступает через согласующее устройство в счетчик импульсов и передается на компьютер для накопления и обработки. Имеется также возможность наблюдения электронных спектров на дисплее компьютера в ходе эксперимента и проведения дополнительных операций с данными, таких как сглаживание, вычитание фона, дифференцирование и интегрирование спектров, различные масштабные преобразования и т. д.

С целью обеспечения чистоты исследуемой поверхности и для ослабления степени рассеяния фотоэлектронов на молекулах остаточных газов вакуумный объем аналитической камеры спектрометра откачивается до давления $\sim 10^{-7}$ – 10^{-9} Па, что соответствует области сверхвысокого вакуума (см. таблицу на с. 75). Для устранения влияния на траектории фотоэлектронов рассеянных магнитных полей, в том числе магнитного поля Земли, используется магнитный экран.

Измерение состава веществ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия является прямым и эффективным методом измерения атомного состава поверхностного слоя вещества. Поскольку элементы периодической системы различаются строением электронных оболочек атомов, то по набору линий в энергетическом спектре фотоэлектронов можно однозначно идентифицировать любой элемент, находящийся в поверхностном слое образца. Исключение составляют водород и гелий, атомы которых методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии не идентифицируются. В отличие от резерфордского обратного рассеяния (см. подразд. 2.5.1), метод позволяет надежно различать элементы, близкие по порядковому номеру в периодической системе. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии можно исследовать очень тонкий приповерхностный слой вещества. Толщина анализируемого слоя определяется в основном глубиной выхода фотоэлектронов и составляет в случае анализа металлов 0,5–2 нм, для оксидов – 1,5–4 нм, для полимеров – 4–10 нм. Анализ более глубоких слоев осуществляется при послойном распылении поверхности образца пучком ионов инертного газа (например, аргона).

Элементный анализ проводится путем сравнения экспериментально полученных фотоэлектронных спектральных линий исследуемого образца с известными значениями энергий связи электронов в атомах элементов, представленными в соответствующих таблицах (см. прил. 8).

Основные особенности энергетических спектров фотоэлектронов, возбуждаемых рентгеновским излучением, рассмотрим на примере спектра, полученного для образца никеля (рис. 2.63). На спектре в разрешенном диапазоне энергий связи ($E_B < h\nu$) проявляются типичные острые пики и растянутые «хвосты». Пики соответствуют энергиям характеристических электронов, покидающих атомы анализируемого материала без потерь энергии. «Хвосты» со стороны большей энергии связи соответствуют электронам, претерпевшим неупругое рассеяние и потерю энергии на пути из образца и выходящим поэтому с несколько меньшей кинетической энергией, что приводит к кажущемуся возрастанию энергии связи. На спектре отчетливо видны линии, соответствующие эмиссии

электронов из атомов под воздействием фотонов рентгеновского излучения, или фотоионизации $2s$ - и $2p$ -, а также $3s$ - и $3p$ -уровней атомов никеля. Наиболее интенсивными являются спектральные линии дублета $2p_{1/2}$ и $2p_{3/2}$. Спектральные дублеты обусловлены расщеплением энергетических p -, d - и f -уровней атомов вследствие спин-орбитального взаимодействия (см. подразд. 2.4.3) и являются характерными при фотоэмиссии электронов из соответствующих электронных состояний атомов.

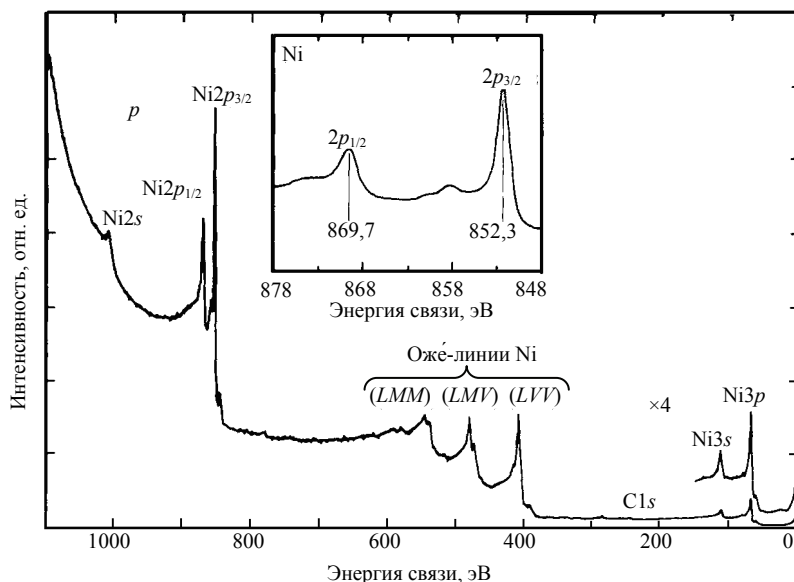


Рис. 2.63. Спектр фотоэлектронов, возбужденных рентгеновским MgK_{α} -излучением с поверхности никеля

Интенсивность I_x спектральной линии зависит от концентрации атомов исследуемого элемента n_x в анализируемом слое, а также от ряда других факторов:

$$I_x = \sigma^k l Y T n_x, \quad (2.129)$$

где σ^k – сечение фотоионизации k -го энергетического уровня элемента данным рентгеновским излучением; l – длина свободного пробега электронов с соответствующей кинетической энергией, характеризующая эффективную глубину выхода фотоэлектронов из вещества; Y – эффективность генерации сигнала, формирующего спектральный пик; T – чувствительность аппаратуры, убывающая с ростом кинетической энергии фотоэлектронов ($T \sim 1 / E_k$).

Сечение фотоионизации характеризует вероятность процесса эмиссии электрона из определенного энергетического состояния атома и зависит от природы атома и конкретного энергетического уровня. Наиболее интенсивным линиям соответствуют обычно большие значения сечений фотоионизации. Значения сечений фотоионизации σ энергетических уровней элементов по отношению к $C1s$ -уровню приведены в прил. 9. В прил. 8 выделены значения энергий связи электронов в атомах элементов, которым соответствуют наиболее интенсивные спектральные линии.

Наряду со спектральными линиями фотоэмиссии на спектре имеются оже-электронные линии, формируемые после испускания атомами электронов из внутренних оболочек по соответствующему механизму (см. подразд. 2.4.7).

Подобными двухэлектронными процессами обусловлено и появление спутников спектральных линий со стороны более высокой энергии связи. Возможны два типа двухэлектронных переходов, ответственных за их возникновение. При испускании фотоэлектрона с внутренней оболочки один из электронов, находящихся на какой-то из внешних оболочек, может перейти в возбужденное, более высокоэнергетичное связанное состояние (встряхивание электрона (*shake-up*)) или же в несвязанное состояние, принадлежащее сплошному спектру (стряхивание электрона (*shake-off*)). В таких процессах на возбуждение или отрыв второго электрона затрачивается дополнительная энергия, и со стороны более высоких энергий связи (меньших кинетических энергий) от основной линии наблюдается спутниковая структура спектральных линий. В частности, такая структура проявляется для каждой из линий $Ni2p$ -дублета (см. врезку на рис. 2.63).

Экспериментальные значения энергии связи электронов, определяемые по фотоэлектронным спектрам, несколько отличаются от табличных значений, которые рассчитаны для атомов в начальном состоянии, когда все их электронные орбитали заняты. При фотоэмиссии, когда удаляется внутренний электрон, электроны внешних оболочек перестраиваются, так как кулоновское притяжение со стороны положительно заряженного ядра оказывается при этом слабее экранированным. Перестройка электронов внешних орбиталей может приводить как к уменьшению, так и к увеличению энергии вылетающего электрона.

Точное значение энергии связи электрона в атоме зависит от химического и кристаллографического окружения атома. Энергия электрона во внутренней оболочке определяется кулоновским взаимодействием с ядром и с другими электронами атома.

Любое изменение в окружении атома будет влиять на пространственное перераспределение заряда валентных электронов и вызывать изменение потенциала, заметное для внутреннего электрона, приводящее к изменению его энергии связи.

Соответствующий энергетический сдвиг является основным источником информации об изменениях в электронной структуре атомов, в частности о природе химической связи, в которой участвуют атомы. В случае анализа поверхности твердого тела выражение для экспериментально определяемого энергетического сдвига можно представить в виде

$$\Delta E_B = \Delta E(q) + \Delta V + \Delta E_R, \quad (2.130)$$

где $\Delta E(q)$ – изменение потенциальной энергии основного электрона за счет изменения потенциала валентных электронов; ΔV – изменение его потенциальной энергии за счет потенциала кристаллической решетки; ΔE_R – изменение энергии релаксации, обусловленной релаксационными перестройками в неравновесной после удаления основного электрона системе, включающей как сам атом, так и окружающие атомы ($\Delta E_R < 0$).

Изменение энергии связи основных уровней, обусловленное изменением распределения заряда в валентной оболочке атома (изменением валентности, координации, образованием и разрывом химических связей), называют химическим сдвигом. Уменьшение электронной плотности в валентной оболочке атома приводит к ослаблению экранирования заряда ядра и возрастанию энергии связи электронов основных уровней, увеличение электронной плотности – к уменьшению энергии связи.

Например, при окислении металла кислородом атомы металла отдают на образование химической связи валентные электроны, что приводит к уменьшению общей электронной плотности, ослаблению экранирования электронами положительного заряда ядра и увеличению энергии связи внутренних электронов (положительному химическому сдвигу). В то же время в спектре основного $1s$ -уровня атомов кислорода будет наблюдаться отрицательный химический сдвиг; уменьшение энергии связи внутренних электронов обусловлено более сильным экранированием заряда ядра вследствие увеличения электронной плотности в валентной оболочке атомов окислителя при образовании химической связи.

На рис. 2.64 приведены спектры фотоэлектронов, возбужденных с уровней $W4f_{7/2}$ и $W4f_{5/2}$, снятые при анализе поверхности вольфрама, покрытого слоем оксида WO_3 различной толщины. По мере увеличения толщины оксидной пленки возрастает количество находящихся в анализируемом слое атомов вольфрама, входящих в состав оксида. Соответственно

возрастает интенсивность спектральных линий, характеризующих положительным химическим сдвигом, и уменьшается интенсивность линий, обусловленных фотоэмиссией из атомов вольфрама в неокисленном состоянии.

Значение сдвига увеличивается с возрастанием прочности химической связи и определяется природой конкретного химического соединения. Химический сдвиг для основных уровней элементов может составлять от долей электронвольта (например, при хемосорбции) до $\sim 5\text{--}7$ эВ в случае высокой степени окисления атомов (например, в высших оксидах). Если атомы какого-либо элемента в анализируемом материале находятся в различных валентных состояниях, то в спектрах обнаруживаются несколько линий, соответствующих данному энергетическому уровню атомов элемента, или уширение спектральной линии (в случае, если величина химических сдвигов не превышает разрешающей способности спектрометра).

Таким образом, по спектрам рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с использованием банка данных по энергиям связи элементов и химическим сдвигам, определенным для соединений-стандартов, можно легко установить элементный состав исследуемого вещества и охарактеризовать химическое состояние каждого из элементов, т. е. провести качественный анализ. Предельная чувствительность метода в определении элемента составляет примерно 1% мономолекулярного слоя; для идентификации химического состояния нужны более высокие концентрации компонента.

При проведении методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии количественного анализа интерес представляет интенсивность спектральных линий (или площадь фотоэлектронных пиков). Корректный количественный анализ возможен в случае, если известно влияние на интенсивность спектральных линий каждого из фигурирующих в выражении (2.129) факторов, многие из которых зависят от конкретного спектрометра, что требует тщательной

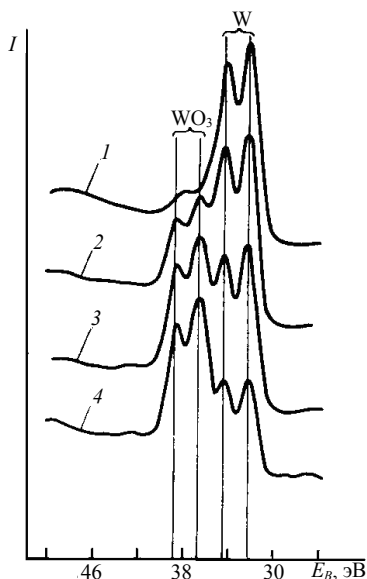


Рис. 2.64. Спектры фотоэлектронов, возбужденных с 4f-уровней атомов вольфрама, снятые при анализе поверхности вольфрама с пленкой оксида различной толщины:

1 – 0,23 нм; 2 – 1,49 нм;
3 – 2,13 нм; 4 – 3,06 нм

калибровки спектрометра с использованием хороших эталонных образцов. Поэтому чаще всего проводят оценку относительного содержания элементов в анализируемом слое. Отношение интенсивностей спектральных линий для двух элементов A и B имеет вид

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{\sigma_A I_A Y_A T_A N_A}{\sigma_B I_B Y_B T_B N_B}. \quad (2.131)$$

Если различие между энергиями связи спектральных линий не очень велико, то $I_A \approx I_B$, $T_A \approx T_B$, $Y_A \approx Y_B$ и отношение концентрации двух элементов может быть определено приближенно из соотношения

$$\frac{N_A}{N_B} \approx \frac{\sigma_B I_A}{\sigma_A I_B}. \quad (2.132)$$

Измерения методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии обеспечивают возможность определения элементного состава анализируемого вещества, электронной структуры атомов, в том числе природы химической связи между ними, оценки относительного содержания атомов различных элементов в анализируемом слое, а также изучения изменений этих параметров в процессе обработки образцов. При идентификации элементов по фотоэлектронным спектрам следует иметь в виду, что обычно исследуются наиболее интенсивные спектральные линии элементов, которым соответствуют высокие значения сечений фотоионизации. Кроме того, экспериментальные значения энергий связи могут вследствие энергетических сдвигов отличаться от табличных в пределах нескольких электронвольт. При наличии различных валентных состояний элемента в анализируемом слое обнаруживается несколько линий, соответствующих данному энергетическому уровню элемента. Для надежной идентификации, как правило, анализируется несколько энергетических уровней атомов каждого из элементов. Наряду с атомами элементов, входящих в состав вещества образца, на поверхности твердого тела с неизбежностью присутствуют адсорбированные примеси, например кислород, пары воды, углеводородные загрязнения и т. д. Поэтому в фотоэлектронных спектрах практически всегда имеются линии кислорода и углерода, которые, как и в случае других легких элементов, соответствуют возбуждению фотоэлектронов с основного $1s$ -уровня.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Поясните смысл величин: работа выхода электрона, энергия связи электрона в атоме вещества. Запишите выражение для энергии связи электронов в атоме вещества, измеряемой фотоэлектронным спектрометром.

2. Каков физический смысл уровня Ферми электронов в металле? Как определяется уровень Ферми в полупроводниках с собственной и примесными проводимостями?
3. Что представляет собой фотоэлектронный спектр? Каковы основные особенности энергетических спектров фотоэлектронов? От каких факторов зависит интенсивность спектральной линии? Каков смысл сечения фотоионизации электронного уровня атома? Какими процессами обусловлены дублетная и спутная структуры спектральных линий?
4. Что понимают под химическим сдвигом энергий связи электронов? Как и почему изменяется энергия связи валентных электронов в атомах: электроположительного элемента (например, металла); электроотрицательного элемента (например, кислорода) при образовании химической связи?
5. Как осуществляется качественный анализ состава вещества по данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии? Как определяется элементный состав анализируемого слоя? Как идентифицируется химическое состояние элементов в анализируемом слое?
6. Каким образом проводится количественный анализ поверхности твердого тела по данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии?
7. Поясните принципы устройства и работы фотоэлектронного спектрометра. Каковы принципы действия источника рентгеновского излучения; рентгеновского монохроматора; электростатического энергоанализатора; канального электронного умножителя; системы регистрации фотоэлектронных спектров?
8. Проанализируйте процесс измерения состава веществ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на основе обобщенной функциональной схемы измерений (рис. 2.1).

2.4.7. Оже-электронная спектроскопия

Оже-эффект. При наличии электронных вакансий на внутренних оболочках атомов наряду с излучательными переходами возможны и безызлучательные электронные переходы. Процесс высвобождения энергии возбужденных атомов при безызлучательных электронных переходах и ее передачи другим электронам атома (оже-процесс) с последующим испусканием электронов лежит в основе метода оже-электронной спектроскопии. Причем безызлучательными могут быть электронные переходы как разрешенные, так и запрещенные правилами отбора. В качестве возбуждающего излучения чаще всего используется поток быстрых электронов. Оже-процесс может инициироваться и другими внешними воздействиями, например при облучении вещества фотонами или ионами соответствующих энергий. Наличие оже-электронных спектральных линий в спектрах рентгеновской фотоэлектронной

спектроскопии (см. подразд. 2.4.6) обусловлено возбуждением оже-процесса рентгеновским излучением. Энергия возбуждающего излучения затрачивается на образование электронных вакансий на внутренних оболочках атомов. Оже-эффект может наблюдаться не только в изолированных атомах, но и в конденсированных средах. В твердом теле наряду с переходами между внутренними энергетическими уровнями атомов имеют место переходы с участием электронов валентной зоны.

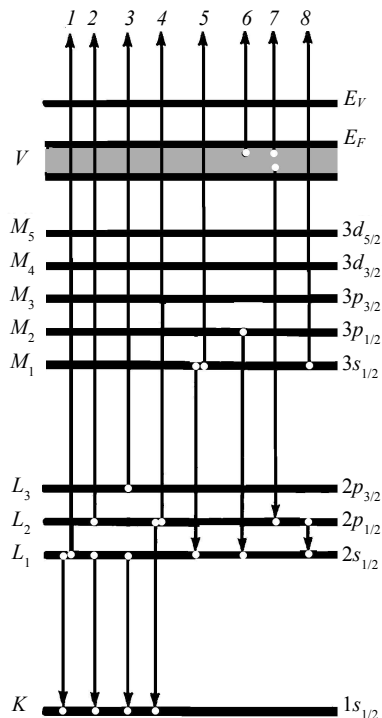


Рис. 2.65. Схема возможных оже-переходов в атомах металла:

- 1 – KL_1L_1 ; 2 – KL_1L_2 ; 3 – KL_1L_3 ; 4 – KL_2L_2 ;
 5 – $L_1M_1M_1$; 6 – L_1M_2V ; 7 – L_2VV ;
 8 – $L_1L_2M_1$ (переход Костера – Кронига).
 V – валентная зона; E_F – уровень Ферми;
 E_V – уровень вакуума

оболочках атомов. Оже-эффект может наблюдаться не только в изолированных атомах, но и в конденсированных средах. В твердом теле наряду с переходами между внутренними энергетическими уровнями атомов имеют место переходы с участием электронов валентной зоны.

На рис. 2.65 представлена схема возможных оже-переходов в атомах металла. В результате оже-эффекта в атоме вместо одной первичной электронной вакансии возникают две новые вторичные вакансии на более высоких энергетических уровнях.

В обозначении оже-переходов первой указывается электронная оболочка, на которой образована первичная вакансия, затем оболочка, электрон которой заполнил эту вакансию, и последней – оболочка, откуда ушел оже-электрон. Так, KL_1L_1 -процесс (1) осуществляется в результате безызлучательного перехода электрона из L_1 -подоболочки на имеющуюся первичную вакансию в K -оболочке; высвобождающаяся при этом энергия передается вто-

рому электрону L_1 -подоболочки, который выбрасывается в вакуум. Кинетическая энергия E_k вылетающего электрона равна разности энергий связи электронов на соответствующих энергетических уровнях:

$$(E_k = E_B^K - E_B^{L_1} - E_B^{L_1}).$$

В L_1 -подоболочке атома формируются при этом две вакансии. Возможны также оже-переходы KL_1L_2 , KL_1L_3 , KL_2L_2 , KL_2L_3 , KL_3L_3 K -серии.

Ожé-переход $L_1M_1M_1$ (5) соответствует двухэлектронному процессу с первоначальной $2s$ -вакансией. При этом один M_1 -электрон заполняет вакансию в L -оболочке, а другой M_1 -электрон выбрасывается. Возможен также выброс ожé-электронов из валентных оболочек атомов, или валентной зоны (см. например, переходы 6 и 7 (рис. 2.65)).

Если вакансия, соответствующая конечному состоянию атома, расположена в той же электронной оболочке, что и первичная вакансия (хотя и не в той же подоболочке), то соответствующий безызлучательный переход (например, $L_1L_2M_1$ (8)) называется переходом Костера – Кронига. Ожé-электрон выбрасывается при этом из M_1 -подоболочки. Эффект Костера – Кронига является частным случаем ожé-эффекта.

Измерение состава веществ методом ожé-электронной спектроскопии. Поскольку для атомов каждого элемента характерен свой набор энергий ожé-электронов, ожé-эффект может быть использован для идентификации элементов, что и лежит в основе ожé-электронной спектроскопии. Элементный состав анализируемого вещества устанавливается по энергетическому распределению испускаемых электронов. Энергия вылетающего электрона определяется, в свою очередь, разностью энергий связи, сопровождающей снятие возбуждения атома при безызлучательном переходе электрона в атоме и испускании ожé-электрона с характеристической энергией. Энергия ожé-электронов не зависит от энергии возбуждающего излучения, тогда как энергия фотоэлектронов линейно изменяется с энергией налетающего фотона. Кроме того, положение энергетических уровней атома зависит от его химического состояния, что позволяет определять, как и в методе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, атомы в соединениях и природу этих соединений.

Анализ веществ методом ожé-электронной спектроскопии осуществляют в электронных спектрометрах, принцип действия которых сходен с принципом работы фотоэлектронных спектрометров. В рабочей камере спектрометра создаются и поддерживаются условия, соответствующие сверхвысокому вакууму. Возбуждающее излучение, чаще всего поток ускоренных электронов, направляется на образец исследуемого вещества. Образующиеся в результате ожé-эффекта и эмиттирующие в вакуум электроны направляются в энергоанализатор. Чаще всего применяются цилиндрические зеркальные дисперсионные и трех- или четырехсечные бездисперсионные энергоанализаторы (см. рис. 2.37, 2.39). Чувствительность дисперсионных анализаторов на два порядка выше чувствительности бездисперсионных анализаторов с тормозящим полем. Распределение электронов по энергиям (ожé-электронный спектр) анализируется как зависимость силы электронного тока от величины

отклоняющего электроны либо тормозящего напряжения. В качестве коллектора электронов используется каналный электронный умножитель.

Полный регистрируемый спектр электронов, испускаемых исследуемым образцом при его облучении первичными электронами, включает упруго отраженные электроны (без потери энергии), электроны, потерявшие часть энергии на возбуждение атомов, и оже-электроны. Причем оже-электронные переходы проявляются в этом спектре как небольшие особенности на сильном фоне вторичных электронов, т. е. значение сигнала измерительной информации очень мало. Поэтому обычно регистрируют энергетическое распределение не числа эмиттировавших электронов $N(E)$, а производной $dN(E)/dE$ от этого числа по энергии, что повышает чувствительность измерений. Изменяя тормозящее электроны напряжение в электростатическом энергоанализаторе (см. подразд. 2.3.3) от нуля до значения, соответствующего энергии направляемых на образец первичных электронов, получают кривую задержки тока электронов, попадающих на коллектор. Дифференцируя кривую задержки тока, получают распределение электронов по энергиям $N(E)$. Дифференцируя еще раз, получают производную $dN(E)/dE$.

Дифференцирование осуществляется путем модуляции задерживающего потенциала. Метод дифференцирования заключается в том, что на задерживающий потенциал коллектора электростатического энергоанализатора накладывается небольшое синусоидальное напряжение с

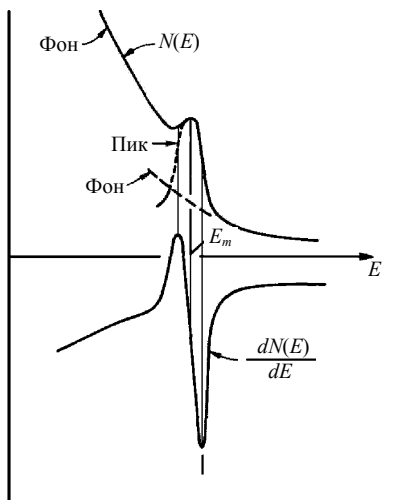


Рис. 2.66. Пример дифференцирования участка спектра с выделением оже-линии

частотой ω . При этом ток в цепи коллектора анализатора содержит компоненты с частотами, кратными ω : ω , 2ω , 3ω и т. д. Амплитуда компоненты с частотой ω пропорциональна $N(E)$, с частотой 2ω — $dN(E)/dE$ и т. д. При подаче на опорный канал детектора модулирующего напряжения нужной частоты, например 2ω , получают производную энергетического распределения электронов $dN(E)/dE$.

На рис. 2.66 приведен пример дифференцирования участка спектра, где на медленно изменяющемся фоне имеется слабый сигнал, соответствующий оже-переходу. Максимуму E_m этого сигнала соответствует значение производной $dN(E)/dE$,

равное нулю, а максимумы производной соответствуют областям наибольшего наклона графика $N(E)$. При дифференцировании минимизируется вклад медленно изменяющегося фона.

Оже-электронная спектроскопия, как и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, позволяет измерять элементный состав приповерхностного слоя вещества толщиной в несколько атомных слоев. Для получения информации о составе более глубоких слоев используется послойное распыление исследуемого материала ускоренными ионами инертного газа. Возможно определение всех элементов периодической системы, за исключением водорода и гелия. Так как вероятность безызлучательных переходов уменьшается с ростом атомного номера элемента, то эффективность анализа атомов более легких элементов выше, чем тяжелых. Чувствительность оже-электронной спектроскопии составляет $\sim 10^{12}$ ат./см².

По интенсивности спектральных линий оценивается количество атомов того или иного элемента в анализируемом слое. Поскольку сильнее всего взаимодействуют между собой электроны атома с близкими орбиталями, то наибольшую интенсивность имеют оже-линии, соответствующие переходам типа KLL или LMM . Скорости переходов Костера – Кронига намного превышают скорости обычных оже-переходов; поэтому их наличие приводит к уменьшению интенсивности спектральных линий, соответствующих другим переходам. Отношение концентраций атомов определенного элемента N_x в анализируемом слое исследуемого образца и в стандартном образце N_x^s определяется выражением

$$\frac{N_x}{N_x^s} = \frac{Y_x}{Y_x^s} \frac{l^s}{l} \frac{1 + R_B^s}{1 + R_B}, \quad (2.133)$$

где Y_x – выход оже-электронов; l – глубина выхода электронов; R_B – коэффициент обратного рассеяния первичных электронов; верхний индекс (s) относится к величинам, характеризующим стандартный образец. Если по составу стандартный образец близок к исследуемому, то относительное содержание атомов элементов может быть определено непосредственно по отношению выходов оже-электронов из исследуемого и стандартного образцов:

$$\frac{N_x}{N_x^s} = \frac{Y_x}{Y_x^s}. \quad (2.134)$$

Как и в измерениях методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, в оже-электронной спектроскопии обнаруживаются химические сдвиги, что позволяет определять химическое состояние атомов. Однако в двухэлектронных оже-процессах интерпретация химических сдвигов

несколько сложнее, чем в фотоэлектронных. Кроме того, ширина оже-линий больше ширины фотоэлектронных спектральных линий. Поэтому методом оже-электронной спектроскопии исследуются в основном изменения химического состояния атомов вещества.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. В чем состоит сущность и каков механизм оже-эффекта?
2. Проанализируйте схему возможных оже-переходов в атомах металла. Как определяется энергия эмиттируемых оже-электронов?
3. Изложите принцип измерения состава вещества методом оже-электронной спектроскопии.
4. Что представляет собой экспериментально получаемый спектр при анализе вещества методом оже-электронной спектроскопии? Какой прием используется для повышения чувствительности регистрации оже-электронных спектральных линий?
5. Опишите методику качественного и количественного анализа состава вещества методом оже-электронной спектроскопии.
6. Проанализируйте процесс измерения состава веществ методом оже-электронной спектроскопии на основе обобщенной функциональной схемы измерений (рис. 2.1).

2.5. Ядерно-физические измерения состава веществ

Наряду с методами измерений состава веществ, основанными на электронных взаимодействиях, разработаны и применяются ядерно-физические методы анализа, в основу которых положены ядерные взаимодействия. При этом используется несколько различных типов ядерных взаимодействий:

- упругое рассеяние заряженной частицы, в том числе ядра, на ядре атома исследуемого вещества;
- возбуждение заряженной частицей ядра и снятие возбуждения с испусканием γ -излучения;
- ядерная реакция между ядрами анализирующей частицы и атома вещества, в результате которой образуются новые ядра.

На исследовании продуктов ядерных реакций, активированных анализирующим излучением, основаны методы мгновеннорадиационного и активационного ядерного анализа; на исследовании спектров излучения возбужденных ядер – методы γ -спектроскопии и ядерного магнитного резонанса; на измерении потерь энергии при упругом рассеянии анализирующих частиц на ядрах – спектрометрия резерфордовского обратного рассеяния.

2.5.1. Спектрометрия резерфордовского обратного рассеяния

2.5.1.1. Физические основы спектрометрии резерфордовского рассеяния. В спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния (РОР) в качестве анализирующего излучения, направляемого на исследуемое вещество, используются пучки ускоренных моноэнергетических легких ионов водорода (^1H) или гелия (^4He). По сути, анализирующие частицы являются ядрами (протоны и двукратно ионизированные атомы гелия); однократно ионизированные атомы гелия ведут себя в процессах ядерных столкновений также подобно ядрам. Коллимированный пучок ионов с начальной энергией E_0 , значения которой лежат обычно в интервале 100–4000 кэВ, направляется на образец исследуемого вещества. При этом небольшая часть падающих ионов испытывает столкновение с ядрами атомов вещества, в результате чего происходит существенное изменение энергии ионов и направления их движения. Менее чем 0,01% от числа падающих ионов рассеивается на угол, превышающий 90° , т. е. испытывает обратное рассеяние и может покинуть исследуемый образец.

Схема упругого резерфордовского взаимодействия двух частиц представлена на рис. 2.67. Частица массой M_1 , имеющая скорость v и энергию E_0 ($E_0 = M_1 v^2 / 2$), налетает на ядро покоящегося в выбранной системе отсчета атома вещества массой M_2 . После столкновения

налетающая частица и ядро атома приобретают соответственно скорости v_1 и v_2 и энергии E_1 и E_2 , значения которых определяются углом рассеяния θ и углом отдачи ϕ . Углы θ и ϕ отсчитываются от начального направления движения налетающей частицы и всегда принимаются положительными. Массы ядер M_1 и M_2 измеряются обычно в атомных единицах массы (а. е. м.).

Законы сохранения энергии и компонентов импульса, параллельных и перпендикулярных направлению движения налетающей частицы, выражаются уравнениями

$$\frac{M_1 v^2}{2} = \frac{M_1 v_1^2}{2} + \frac{M_2 v_2^2}{2}; \quad (2.135)$$

$$M_1 v = M_1 v_1 \cos \theta + M_2 v_2 \cos \phi; \quad (2.136)$$

$$0 = M_1 v_1 \sin \theta - M_2 v_2 \sin \phi. \quad (2.137)$$

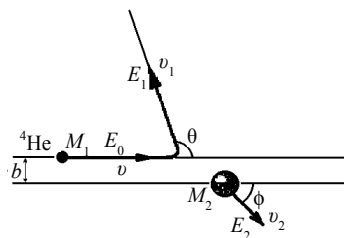


Рис. 2.67. Схема резерфордовского рассеяния иона гелия на ядре атома вещества

Отсюда отношение скоростей налетающей частицы

$$\frac{v_1}{v} = \frac{\pm (M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2} + M_1 \cos \theta}{M_2 + M_1}. \quad (2.138)$$

Отношение энергий налетающей частицы в случае $M_1 < M_2$, когда в формуле (2.138) имеет место знак «+», определяется выражением

$$K = \frac{E_1}{E_0} = \left[\frac{(M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2} + M_1 \cos \theta}{M_2 + M_1} \right]^2. \quad (2.139)$$

Это отношение энергий $E_1 / E_0 = K$ называют кинематическим фактором рассеяния или K -фактором. K -фактор показывает, какую часть от кинетической энергии E_0 налетающей анализирующей частицы составляет энергия этой же частицы после рассеяния на ядре массой M_2 . Из соотношения (2.139) следует, что энергия рассеянной частицы E_1 определяется только массами частиц M_1 и M_2 и углом рассеяния θ . Чем больше масса M_2 рассеивающего ядра, тем меньше потери энергии анализирующей частицы и тем больше значение K -фактора. При увеличении угла рассеяния θ K -фактор монотонно убывает. Скорость убывания зависит от M_1 и M_2 , она растет с увеличением массы анализирующих частиц M_1 и уменьшается с возрастанием M_2 .

Энергия рассеянной частицы зависит от массы ядра, с которым произошло столкновение, благодаря чему метод позволяет проводить анализ элементного состава вещества.

В прил. 10 приведены значения K -фактора при рассеянии ионов ^4He на ядрах различных элементов в зависимости от угла рассеяния θ .

Разрешение по массам значительно выше при анализе легких элементов. В общем случае считается, что для элементов с $M_2 \leq 40$ а. е. м. возможно различать изотопы, а надежная идентификация элементов при использовании в качестве анализирующих ионов гелия возможна для элементов с массой M_2 до 100 а. е. м. Разрешение по массам может быть повышено применением более тяжелых, чем ионы ^1H и ^4He , анализирующих частиц, но это обычно не делается из-за сужения области доступных для анализа элементов и уменьшения толщины анализируемого слоя (рис. 2.68).

Различия в кинематических факторах рассеяния на ядрах соседних элементов достигают своих максимальных значений при углах θ , близких к 180° (рис. 2.69). В соответствии с характером зависимости K -фактора изменяется и энергия рассеянных частиц E_1 ($E_1 = KE_0$). Поэтому при проведении элементного анализа методом резерфордовского обрат-

ного рассеяния наилучшее разрешение по массам достигается при возможно больших углах θ ; обычно они выбираются близкими к 170° (из-за конечных размеров детектора рассеянных частиц).

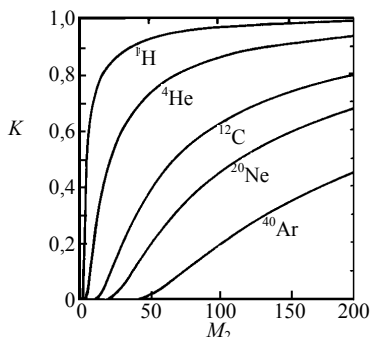


Рис. 2.68. Зависимость кинематического фактора рассеяния от массы ядер атомов исследуемого вещества для различных анализирующих ионов

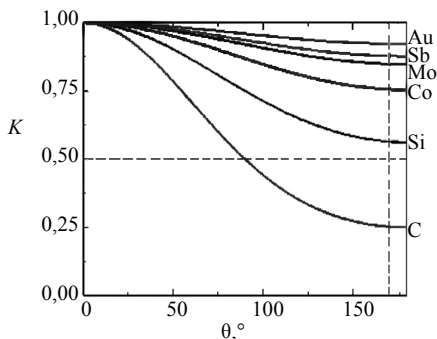


Рис. 2.69. Зависимость кинематического фактора от угла рассеяния ионов ^4He на ядрах атомов ряда элементов

При анализе поверхностных атомов образца исследуемого вещества угол рассеяния θ определяется только взаимным расположением анализирующего пучка и детектора, и энергия рассеянных частиц не зависит от ориентации образца по отношению к пучку, что позволяет однозначно определять M_2 , а следовательно, и природу рассеивающего ядра. В случае если атом залегает на некоторой глубине, его идентификация таким образом уже невозможна. Поскольку вероятность рассеяния анализирующих ионов на ядрах атомов весьма мала, то большинство из них проникает на глубину до тысяч атомных слоев, прежде чем произойдет ядерное столкновение. При этом энергия ионов расходуется на возбуждение электронной подсистемы вещества. Величина, на которую регистрируемая энергия рассеянных частиц меньше максимально возможной, соответствующей столкновениям на поверхности, зависит от пути, пройденного ионом в веществе.

На рис. 2.70 схематически показаны слагаемые потерь энергии

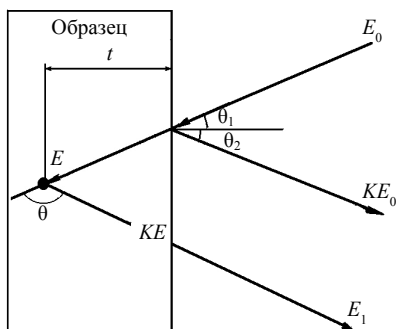


Рис. 2.70. Слагаемые потерь энергии иона, рассеивающегося на глубине t анализируемого образца

для частицы, рассеивающейся на ядре атома, расположенного на некоторой глубине t . Они включают потери энергии в результате электронного торможения на пути входа в вещество:

$$\Delta E_{\text{вх}} = \left. \frac{dE}{dx} \right|_{E_{\text{вх}}} \frac{t}{\cos \theta_1}, \quad (2.140)$$

где θ_1 – угол падения анализирующих ионов на поверхность образца;
 $\left. \frac{dE}{dx} \right|_{E_{\text{вх}}}$ – потери энергии на единице пути иона. Тогда энергия иона на глубине t

$$E_t = E_0 - \Delta E_{\text{вх}}. \quad (2.141)$$

Затем часть энергии иона теряется при упругом рассеянии на ядре атома вещества:

$$\Delta E_s = (1 - K) E_t. \quad (2.142)$$

И наконец, в результате электронного торможения на пути выхода иона из вещества имеют место потери энергии:

$$\Delta E_{\text{вых}} = \left. \frac{dE}{dx} \right|_{E_{\text{вых}}} \frac{t}{\cos \theta_2}, \quad (2.143)$$

где θ_2 – угол между нормалью к поверхности образца и направлением на детектор;
 $\left. \frac{dE}{dx} \right|_{E_{\text{вых}}}$ – потери энергии на единице пути иона.

Конечная энергия частицы

$$E_1 = E_0 - \Delta E_{\text{вх}} - \Delta E_s - \Delta E_{\text{вых}}. \quad (2.144)$$

Разность энергий ионов, претерпевших резерфордское рассеяние на ядрах атомов элемента, расположенных на поверхности и на глубине t ,

$$\Delta E = KE_0 - E_1 = \left[\frac{K}{\cos \theta_1} \left. \frac{dE}{dx} \right|_{E_{\text{вх}}} + \frac{1}{\cos \theta_2} \left. \frac{dE}{dx} \right|_{E_{\text{вых}}} \right] t. \quad (2.145)$$

Потери энергии анализирующих ионов нелинейно зависят от энергии, однако, в случае если относительные потери энергии невелики, можно считать их постоянными и равными потерям при $E_{\text{вх}}$ и $E_{\text{вых}}$ соответственно. Часто вместо тормозной способности dE/dx оказывается более удобным использовать сечение торможения:

$$\varepsilon = \frac{dE}{dx} \frac{1}{N}, \quad (2.146)$$

где N – плотность атомов исследуемого вещества. С учетом (2.146) выражение (2.145) можно записать следующим образом:

$$\Delta E = [\varepsilon] Nt, \quad (2.147)$$

где $[\varepsilon]$ – фактор тормозного сечения:

$$[\varepsilon] = \left[\frac{K}{\cos \theta_1} \varepsilon_{\text{вх}} + \frac{1}{\cos \theta_2} \varepsilon_{\text{вых}} \right]. \quad (2.148)$$

Если рассеяние происходит на не слишком большой глубине, то можно использовать приближение рассеяния на поверхности, предполагающее, что $E_{\text{вх}} = E_0$, а $E_{\text{вых}} = KE_0$. В этом приближении фактор тормозного сечения в однородном по составу материале

$$[\varepsilon_0] = \left[\frac{K}{\cos \theta_1} \varepsilon(E_0) + \frac{1}{\cos \theta_2} \varepsilon(KE_0) \right]. \quad (2.149)$$

В случае наличия в материале примесей фактор тормозного сечения на ядре примеси

$$[\varepsilon]_j^i = \left[\frac{K_j}{\cos \theta_1} \varepsilon_i(E_0) + \frac{1}{\cos \theta_2} \varepsilon_i(K_j E_0) \right], \quad (2.150)$$

где индекс i относится к тормозящей среде – основному материалу, а индекс j – к рассеивающему центру – ядру атома примеси. Из сопоставления (2.149) и (2.150) следует, что $[\varepsilon_0] = [\varepsilon]_i^i$.

Имеются справочные таблицы, содержащие полуэмпирические значения тормозных способностей dE/dx или сечений торможения ε для всех элементов. В прил. 11 представлены значения сечений торможения ионов ^4He на атомах различных элементов в зависимости от энергии. Тормозная способность измеряется обычно в электронвольтах на ангстрем (эВ/Å) или в электронвольтах на нанометр (эВ/нм); единица измерения сечения торможения и фактора тормозного сечения: $[\varepsilon] = \text{эВ}/(\text{атом}/\text{см}^2)$.

Вследствие энергетических потерь, испытываемых анализирующими ионами при прохождении слоя анализируемого вещества, метод является чувствительным к глубине, на которой находятся атомы того или иного элемента. Использование значений тормозных способностей, сечений торможения и факторов тормозного сечения дает возможность расчета глубины или, точнее, количества атомов исследуемого вещества в расчете на единицу площади на глубине от поверхности до точки столкновения.

На этом основаны измерение глубины и расчет профилей распределения элементов по данным спектрометрии РОР.

Таким образом, измеряя энергию ионов, рассеянных на определенном угле, можно получить информацию о природе и концентрации различных атомов, составляющих исследуемый материал, а также о распределении атомов по глубине образца. Толщина анализируемого приповерхностного слоя определяется в основном пробегом ионов. В общем случае достаточно точные измерения профилей распределения атомов при использовании пучка ионов гелия удастся получить до глубины порядка 1 мкм.

Наряду с кинетическими параметрами в спектрометрии РОР важным параметром, определяющим чувствительность метода, является дифференциальное сечение рассеяния – отношение числа частиц, рассеянных в единичный телесный угол, к числу частиц, налетающих на единицу поверхности образца. Определяется дифференциальное сечение рассеяния формулой Резерфорда:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left[\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2E \sin^2 \theta} \right]^2 \frac{[\cos \theta + \sqrt{1 - [(M_1 / M_2) \sin \theta]^2}]^2}{\sqrt{1 - [(M_1 / M_2) \sin \theta]^2}}, \quad (2.151)$$

где Z_1 и Z_2 – атомный номер анализирующего иона и атома рассеивающего ядра соответственно; e – элементарный заряд ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); E – энергия анализирующей частицы непосредственно перед рассеянием. Из формулы (2.151) следует, что вероятность выхода обратного рассеяния пропорциональна квадрату атомного номера элемента, входящего в состав исследуемого вещества. Следовательно, метод резерфордовского обратного рассеяния более чувствителен к тяжелым элементам. Поскольку в спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния телесный угол захвата детектора Ω очень мал ($\leq 10^{-2}$ ср), то вводят среднее дифференциальное сечение рассеяния σ :

$$\sigma = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega. \quad (2.152)$$

В прил. 12 приведены значения сечений резерфордовского рассеяния ионов ^4He , рассчитанные по формуле (2.151) при $E = 1$ МэВ. Измеряются сечения $d\sigma / d\Omega$ и σ обычно в квадратных сантиметрах на стерадиан ($\text{см}^2/\text{ср}$) (или просто в квадратных сантиметрах), а также в барн, где $1 \text{ барн} = 1 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$. Величина $d\sigma / d\Omega$ возрастает при уменьшении угла рассеяния и достигает больших значений при $\theta < 90^\circ$.

2.5.1.2. Измерение состава веществ методом резерфордовского обратного рассеяния. При измерении состава вещества методом резерфордовского обратного рассеяния на расположенный в аналитической камере исследуемый образец в условиях высокого вакуума направляется из ионного источника узкий моноэнергетический пучок анализирующих ионов, ускоренных до энергии 1–4 МэВ. Моноэнергетичность ионного пучка достигается путем выделения из первичного пучка, формируемого вытягивающим электродом ионного источника, ионов с одинаковым удельным зарядом при отклонении в магнитном поле и последующего ускорения пучка постоянным электрическим полем. Необходимое для ускорения ионов высокое напряжение получается с использованием электростатического генератора Ван-де-Граафа. Формирование узкого ионного пучка осуществляется коллимирующей системой диафрагм и ионных линз. Заряд q , приносимый анализирующим пучком на образец, регистрируется интегратором тока. Обратнорассеянные ионы регистрируются поверхностно-барьерным кремниевым детектором (см. рис. 2.47), который устанавливается под углом рассеяния θ по отношению к направлению первичного ионного пучка.

Измерительная информация, получаемая методом резерфордовского обратного рассеяния, регистрируется в виде энергетического спектра обратнорассеянных ионов, где по оси абсцисс откладывается номер канала анализатора, а по оси ординат – выход обратного рассеяния в импульсах. Поскольку каждому каналу многоканального анализатора импульсов соответствует определенный небольшой интервал энергий ионов, то номер канала однозначно связан с энергией регистрируемых рассеянных частиц. Спектр представляет собой распределение ионов, рассеянных на ядрах атомов исследуемого вещества, по кинетическим энергиям. Форма спектра зависит от природы анализирующих ионов, их энергии, а также от природы и состава исследуемого образца. Рассмотрим несколько наиболее характерных примеров спектров резерфордовского обратного рассеяния.

На рис. 2.71 приведен спектр резерфордовского обратного рассеяния ионов ${}^4\text{He}$ с энергией $E_0 = 3$ МэВ, рассеянных под углом $\theta = 170^\circ$ на алюминиевой пленке толщиной 400 нм, покрытой с обеих сторон золотыми маркерами (~ 3 монослоя Au). В спектре в области более низких энергий (вблизи $E \approx 1,5$ МэВ) имеется пик, соответствующий рассеянию ионов ${}^4\text{He}$ на ядрах атомов алюминия. Значение K -фактора для алюминия равно 0,5525 (см. прил. 10), и ионам ${}^4\text{He}$, рассеянным на ядрах атомов Al, расположенных на поверхности анализируемого образца, соответствует энергия $E = 1,6575$ МэВ. На спектре эта энергия обозначена вертикальной стрелкой. Ионы ${}^4\text{He}$ с меньшей энергией, формирующие

обсуждаемый спектральный пик, рассеяны на ядрах более глубоких атомов алюминиевой пленки. Толщину пленки можно определить по полуширине спектрального пика на половине высоты ΔE_{Al} . Ионам гелия, рассеянным на ядрах поверхностных атомов золота, соответствует энергия $E = 2,7675$ МэВ ($K_{Au} = 0,9225$), поэтому спектральные пики, формируемые ионами ^4He , рассеянными на золоте, расположены в области более высоких энергий. Правый спектральный пик Au_1 соответствует ионам ^4He , рассеянными на правом маркере, обращенном к налетающим ионам гелия, а левый пик Au_2 — ионам гелия, рассеянными на левом маркере и потерявшим часть энергии при прохождении алюминиевой пленки туда и обратно.

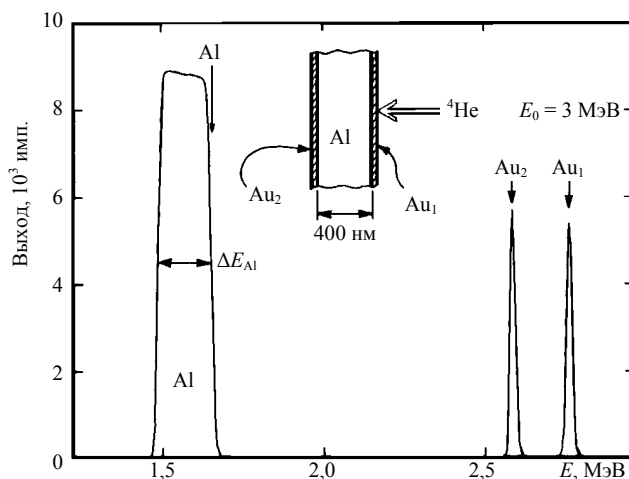


Рис. 2.71. Спектр ROP ионов ^4He на алюминиевой пленке, покрытой с обеих сторон тонкими маркерами из золота

На рис. 2.72 схематически изображены спектры резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He от поверхности кремния с нанесенной пленкой никеля.

В случае четкой границы между пленкой и кремниевой подложкой (рис. 2.72, а) имеют место спектральные пики, соответствующие рассеянию анализирующих частиц на кремнии и никеле. Так как масса атомов никеля больше массы атомов кремния, то при рассеянии на ядрах атомов никеля энергетические потери ионов гелия меньше, значение K -фактора больше; и спектральному пику, обусловленному рассеянием на никеле, соответствуют большие энергии регистрируемых ионов. В отсутствие пленки сигнал, обусловленный рассеянием анализи-

рующих ионов на ядрах атомов массивной (толстой) кремниевой подложки, простирался бы на весь интервал энергий $E \leq K_{\text{Si}} E_0$. Но поскольку кремниевая подложка находится под пленкой никеля и атомы кремния не выходят на поверхность, то сигнал от подложки расположен при энергиях намного меньше значения $K_{\text{Si}} E_0$. Сигналу от тонкой пленки никеля соответствует определенный небольшой энергетический интервал ΔE , расположенный при $E \leq K_{\text{Ni}} E_0$.

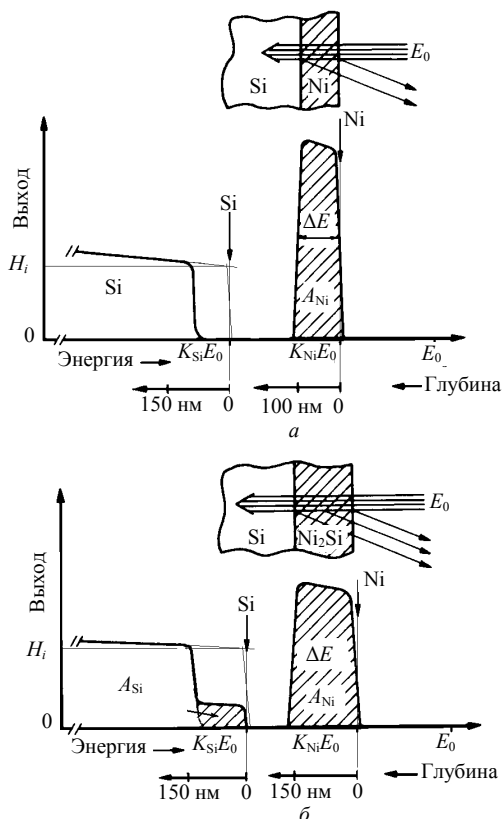


Рис. 2.72. Спектры РОР ионов ^4He от поверхности кремния с нанесенной никелевой пленкой:

a – до термообработки; *б* – после термообработки

При идеальной разрешающей способности спектрометра, с помощью которого регистрируется спектр резерфордовского обратного рассеяния, краям спектральных сигналов соответствовало бы строго определенное

значение энергии; края были бы вертикальными. Однако из-за ограничений по разрешающей способности реального спектрометра края спектральных сигналов несколько размываются.

В результате термообработки вследствие взаимной диффузии атомов никеля и кремния в приповерхностной области формируется силицид никеля Ni_2Si . В спектре (рис. 2.72, б) на сигнале от кремния появляется ступенька A_{Si} , соответствующая наличию кремния в слое силицида; при этом атомы кремния, входящие в состав силицида металла, выходят на поверхность исследуемого образца. Ширина сигнала от никеля ΔE_{Ni} несколько увеличивается из-за уширения никельсодержащего слоя.

Рассмотрим порядок обработки спектров резерфордовского обратного рассеяния. Первым шагом является калибровка энергетической шкалы анализатора. При этом осуществляется переход от шкалы «номер канала анализатора» по оси абсцисс к шкале «энергия». При ручной обработке используется линейная калибровка по двум точкам, которая достаточно хорошо согласуется с реальным соотношением между этими параметрами и не вносит больших погрешностей в результат. Для калибровки необходимо точно знать номера каналов анализатора, соответствующие положению сигналов от поверхности для двух элементов, по возможности максимально отличающихся по значениям атомных масс. По таблицам (см. прил. 10) определяются значения K -фактора для обоих элементов при заданном угле рассеяния и рассчитываются энергии, соответствующие этим каналам (см. (2.139)):

$$E_i = K_i E_0. \quad (2.153)$$

После этого рассчитывается энергетическая ширина канала, измеряемая в килоэлектронвольтах на канал (кэВ/канал):

$$\delta E = \frac{E_2 - E_1}{n_2 - n_1}, \quad (2.154)$$

где n_1 и n_2 – номера каналов, соответствующие положению сигналов от поверхности. С использованием вычисленного значения δE и табличных значений K -факторов по имеющимся спектральным пикам определяются другие элементы, входящие в состав анализируемого слоя вещества. Энергии и номера каналов анализатора, соответствующие анализирующим ионам, претерпевшим упругое рассеяние на ядрах атомов, расположенных на поверхности, наносятся на спектр (см. рис. 2.71, 2.72).

Следующим этапом обработки спектра является построение шкалы глубин (определение толщины δt , соответствующей одному каналу анализатора, и нанесение полученного масштаба на ось энергии

(см. рис. 2.72)) для каждого из элементов. Причем шкалы глубин для основного материала (матрицы) и каждой из примесей могут существенно различаться. Для построения шкалы глубин с использованием табличных значений сечений торможения ε (см. прил. 11) по формуле (2.150) рассчитывается фактор тормозного сечения $[\varepsilon]_j^i$ и определяется на основании (2.147) толщина δt поверхностного слоя, соответствующая одному каналу анализатора:

$$\delta t = \frac{\delta E}{N[\varepsilon]_j^i}, \quad (2.155)$$

где N – атомная плотность основного материала исследуемого образца. Значение δt удобно представлять в нанометрах на канал (нм/канал).

Высота спектра резерфордовского обратного рассеяния от отдельного элемента на определенном участке определяется соотношением

$$H_i = q\Omega\sigma_i N_i \delta t, \quad (2.156)$$

где q – количество (заряд) направляемых на образец анализирующих ионов; Ω – телесный угол захвата детектора; σ_i – дифференциальное сечение рассеяния анализирующих ионов на ядрах i -го элемента; $N_i \delta t$ – количество атомов элемента в слое образца толщиной δt .

С учетом (2.155) высота сигнала от матрицы

$$H_i = q\Omega\sigma_i \frac{\delta E}{[\varepsilon]_i^i} \quad (2.157)$$

и примеси

$$H_j = q\Omega\sigma_j \frac{N_j}{N_i} \frac{\delta E}{[\varepsilon]_j^i}, \quad (2.158)$$

где N_j и N_i – концентрации соответственно атомов примеси и матрицы в слое δt . Отношение высоты сигнала примеси к высоте сигнала матрицы

$$\frac{H_j}{H_i} = \frac{\sigma_j}{\sigma_i} \frac{N_j}{N_i} \frac{\delta E / [\varepsilon]_j^i}{\delta E / [\varepsilon]_i^i} = \frac{\sigma_j [\varepsilon]_i^i N_j}{\sigma_i [\varepsilon]_j^i N_i}. \quad (2.159)$$

Отсюда отношение концентраций элементов

$$\frac{N_j}{N_i} = \left[\frac{\sigma_i [\varepsilon]_j^i}{\sigma_j [\varepsilon]_i^i} \right] \frac{H_j}{H_i}. \quad (2.160)$$

На основе равенства (2.160) осуществляется определение относительной концентрации примеси, а также расчет профиля распределения примеси.

Расчет профиля распределения примеси проводится пошагово, начиная от уровня поверхности. Вначале строятся шкалы глубин для матрицы и примеси. Затем по формуле (2.160) вычисляется отношение концентрации элементов в слое δt вблизи поверхности образца. Далее расчет отношения концентраций проводится с определенным шагом по глубине. При этом высоты сигналов от примеси и матрицы берутся на одинаковой глубине исследуемого образца.

Определение интегрального количества атомов примеси в исследуемом веществе осуществляется по площади A_j под спектральным пиком примеси. Просуммировав все отсчеты (в импульсах) под пиком примеси, получаем в соответствии с (2.156) выражение

$$A_j = q\Omega\sigma_j N_j t = q\Omega\sigma_j (Nt)_j, \quad (2.161)$$

где $(Nt)_j$ – интегральное количество примеси в анализируемом слое (слоевое содержание примеси), измеряемое в атомах на квадратный сантиметр (атом/см²). Сопоставляя площадь под пиком примеси A_j и высоту сигнала матрицы H_i , а именно из отношения выражений (2.161) и (2.157), имеем:

$$(Nt)_j = \frac{A_j \sigma_i \delta E}{H_i \sigma_j [\varepsilon]_i}. \quad (2.162)$$

На рис. 2.72 схематично показано, как следует определять высоту H_i сигнала кремниевой матрицы. При определении площади A_j под спектральным пиком той или иной примеси необходимо провести вычитание фона. В спектре, представленном на рис. 2.72, вычитание фона проведено. Определив площадь A_{Si} , соответствующую кремнию, входящему в состав силицида никеля, и рассчитав слоевые содержания кремния $(Nt)_{Si}$ и никеля $(Nt)_{Ni}$ в силициде, можно по отношению слоевых содержаний атомов этих элементов оценить стехиометрию силицида.

Таким образом, метод резерфордовского обратного рассеяния позволяет измерять элементный состав материалов, концентрацию элементов в приповерхностном слое, их стехиометрию, распределение элементов по глубине и т. д. Чувствительность метода определяется минимальным количеством примеси, которое возможно обнаружить с погрешностью не более 100%. Чувствительность спектрометрии ROP при регистрации атомов тяжелой примеси в легкой матрице во много раз выше, чем при регистрации атомов легкой примеси. На это указывает зависимость сечения резерфордовского рассеяния от Z^2 . Например, при анализе в кремнии примесей с атомной массой свыше 100 а. е. м. достижима чувствительность $<10^{13}$ см⁻² (порядка 0,01 монослоя, или около 0,01 ат. %). Анализ легких примесей в тяжелых матрицах затруд-

нен наложением парциальных спектров от различных элементов. Энергии ионов, рассеянных на ядрах легких примесей, лежат в той области спектра, в которую попадают и ионы, рассеянные на более тяжелых ядрах основного материала, поэтому слабый примесный сигнал наблюдается на фоне интенсивного основного сигнала.

Важнейшими факторами, определяющими разрешение метода резерфордовского обратного рассеяния по массам анализируемых элементов и глубине, являются энергетическое разрешение спектрометра и энергетический разброс анализирующих ионов. Энергетический разброс обусловлен флуктуациями энергетических потерь анализирующих частиц при прохождении слоя вещества, его величина возрастает с глубиной. При анализе поверхностных слоев небольшой глубины (до 1 мкм) разрешающая способность метода определяется в основном энергетическим разрешением спектрометра. Оно является характеристикой используемого оборудования и в применяемом интервале энергий практически не зависит от энергии регистрируемых частиц. Обычно используемые при анализе кремниевые поверхностно-барьерные детекторы имеют энергетическое разрешение 15–20 кэВ, которое определяется как ширина сигнала, полученного от стандартного источника α -частиц, на половине его высоты. Энергетическое разрешение можно также определить по правому ведущему краю спектра резерфордовского обратного рассеяния от моноизотопного вещества как энергетический интервал между уровнями от 12 до 88% выхода рассеяния.

В этой связи методом резерфордовского обратного рассеяния ионов ${}^4\text{He}$ с энергией 2,0 МэВ, например, можно разрешать изотопы с массами до 40 а. е. м. В то же время, для вещества, содержащего элементы с атомными массами порядка 200 а. е. м., разрешение по массам составляет около 20 а. е. м., что приводит к невозможности различить атомы элементов, находящихся, например, между ${}^{181}\text{Ta}$ и ${}^{201}\text{Hg}$.

В то время как энергетическое разрешение является универсальной характеристикой спектрометра, разрешение по глубине зависит от природы исследуемого материала и условий эксперимента. Так, при рассеянии ионов ${}^4\text{He}$ с $E_0 = 2,0$ МэВ под углом $\theta = 170^\circ$ при энергетическом разрешении спектрометра 16 кэВ разрешение по глубине в кремнии составляет 35 нм, а в золоте – 12 нм. Регистрация же спектра под углом $\theta = 104^\circ$ позволяет достичь и для кремния разрешения по глубине в 12 нм.

Исследование энергетических спектров обратнорассеянных быстрых ионов дает уникальную возможность измерения толщины и состава слоев, находящихся на поверхности и на глубине до 1 мкм, не разрушая исследуемый объект. Спектрометрия обратного рассеяния позволяет осуществлять качественный и количественный анализ состава исследуемого

материала, тонкопленочных, в том числе многослойных покрытий на поверхности различных подложек, поверхностных оксидов и других химических соединений. Среди преимуществ метода РОР необходимо также отметить хорошо разработанные метрологические основы, что позволяет получать количественные результаты без использования образцов-стандартов.

Наряду с резерфордовским обратным рассеянием быстрых ионов (с энергией порядка мегаэлектронвольт) при измерении состава тонких поверхностных слоев веществ используется резерфордовское рассеяние ионов средних (~ 100 кэВ) и низких ($\sim 0,1$ – 10 кэВ) энергий. При этом направляемые на образец ионы инертного газа (в частности гелия) рассеиваются на атомах поверхностного слоя и после рассеяния регистрируются электростатическим энергоанализатором (см. с. 156–159). В силу небольших значений кинетической энергии анализирующие частицы, проникающие глубже первого мономолекулярного слоя исследуемого вещества, после рассеяния выходят в основном в виде нейтральных атомов. Поскольку электростатический анализатор регистрирует распределение только заряженных частиц, то метод характеризуется высокой чувствительностью по отношению к определению состава очень тонкого поверхностного слоя вещества.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Поясните механизм резерфордовского рассеяния ускоренных высокоэнергетических частиц на атомных ядрах. Запишите выражения законов сохранения энергии и импульса при резерфордовском рассеянии.
2. Что понимают под кинематическим фактором (K -фактором) рассеяния? От каких параметров зависит значение K -фактора? Опишите характер этих зависимостей.
3. Каковы механизм и слагаемые потерь энергии при рассеянии анализирующей частицы на ядрах атомов, расположенных на некоторой глубине? Запишите выражение для разности энергий ионов, рассеянных на поверхности и на некоторой глубине t . Что понимают под тормозной способностью вещества; сечением торможения? Каковы единицы измерения сечения торможения? Запишите выражение для фактора тормозного сечения в приближении рассеяния на поверхности.
4. Что понимают под дифференциальным сечением рассеяния ионов? Каковы единицы измерения сечения рассеяния?
5. Опишите аналитические возможности метода РОР.
6. Как по спектру РОР осуществить калибровку энергетической шкалы анализатора?
7. Как строится шкала глубин для каждого из элементов, входящих в состав анализируемого вещества?

8. Как определяется относительная концентрация атомов элементов в анализируемом слое? Как осуществляется расчет профиля распределения атомов по глубине?
9. Как определяется слоевое содержание атомов элемента по спектрам РОР?
10. От каких факторов зависят чувствительность и разрешающая способность спектрометрии РОР?
11. Поясните принципы устройства и работы спектрометра обратного рассеяния, а также принцип действия полупроводникового поверхностно-барьерного детектора.
12. Проанализируйте процесс измерения состава веществ методом РОР на основе обобщенной функциональной схемы измерений (рис. 2.1).
13. Каковы особенности применения метода резерфордовского обратного рассеяния ионов средних и низких энергий?

2.5.2. Основы ядерного активационного микроанализа

Ядерный активационный анализ – аналитический метод определения качественного и количественного состава веществ путем измерения радиоактивного излучения ядер, возбуждаемых в процессе индуцированных ядерных превращений. Активационный анализ является высокочувствительным неразрушающим методом определения очень малых количеств атомов элементов в исследуемом образце. Он является практически незаменимым при определении атомов легких элементов – водорода и гелия, которые другими рассмотренными ранее методами не определяются.

На исследуемое вещество в качестве анализирующего излучения направляется поток либо нейтронов, либо ускоренных заряженных частиц (ионов). Энергия заряженной частицы должна быть достаточной для того, чтобы преодолеть энергию кулоновского отталкивания ядра атома исследуемого вещества и перевести ядро в возбужденное состояние. Практическое применение в активационном анализе получили ядра изотопов водорода: протоны p , дейтроны d , тритоны ${}^3\text{H}$, а также гелия: ${}^3\text{He}$ и α -частицы ${}^4\text{He}$.

Источниками нейтронов являются ядерные реакторы, а также специальные малогабаритные нейтронные генераторы, в основе принципа действия которых лежит процесс деления тяжелых ядер. Например, генератор на основе изотопа ${}^{252}\text{Cf}$ позволяет получать $2,5 \cdot 10^6$ нейтронов в секунду в расчете на 1 мкг. Единственным типом тяжелых заряженных частиц, испускаемых при распаде радиоактивных изотопов тяжелых элементов, являются α -частицы, а источником α -излучения, применяемым в активационном анализе, – достаточно долгоживущий изотоп ${}^{241}\text{Am}$.

Заряженные частицы также можно получить в результате ядерных реакций.

Наибольший интерес представляют реакции, которые дают заряженные частицы при облучении потоками тепловых нейтронов, так как в этом случае вследствие исключительно высоких потоков нейтронов и сечений соответствующих реакций можно получить высокий выход заряженных частиц. Практическое применение для получения ядер изотопа ${}^3\text{H}$ нашла реакция ${}^8\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$. При использовании тритонов, получаемых в этой реакции, для активационного анализа исследуемый образец в виде тонкоизмельченного порошка тщательно смешивают с порошкообразной солью лития. В результате каждая частица анализируемого материала оказывается окруженной частицами соли, которые при облучении в реакторе нейтронами становятся источниками тритонов.

Получение потоков легких ионов (протонов, ядер гелия, ионов других элементов) в лабораторных условиях возможно с помощью ускорителя спектрометра обратного рассеяния.

При облучении исследуемого вещества потоком частиц часть из них испытывает упругое резерфордское рассеяние, а часть захватывается ядром с образованием так называемого составного ядра. Составное ядро переходит в возбужденное состояние. Энергия возбуждения распределяется между нуклонами ядра случайным образом, так что ни один из них не обладает достаточной энергией для того, чтобы сразу покинуть ядро. Снятие возбуждения составного ядра может проходить различными путями: испусканием γ -излучения, протонов, нейтронов, α -частиц и т. д. Однако при увеличении энергии первичных анализирующих частиц возможны прямые взаимодействия, в результате которых некоторые нуклоны или группы нуклонов (например, дейтроны, α -частицы) могут быть непосредственно выброшены из ядра. Реакции с образованием составного ядра более вероятны при сравнительно низких энергиях; вероятность прямого взаимодействия возрастает с увеличением энергии возбуждающего корпускулярного излучения. Если в процессе измерения регистрируется излучение, испускаемое непосредственно во время возбуждения, то осуществляется мгновенно-радиационный анализ; при регистрации наведенного ранее излучения реализуется (через составное ядро) активационный анализ. Например, при облучении ядра углерода ${}^{12}\text{C}$ протоном может образоваться возбужденное составное ядро ${}^{13}\text{N}^*$, которое, в свою очередь, может распадаться различными путями: ${}^{13}\text{N}^* \rightarrow \gamma + {}^{13}\text{N}$; ${}^{13}\text{N}^* \rightarrow p + {}^{12}\text{C}$; ${}^{13}\text{N}^* \rightarrow n + {}^{12}\text{N}$; ${}^{13}\text{N}^* \rightarrow d + {}^{11}\text{C}$; ${}^{13}\text{N}^* \rightarrow \alpha + {}^9\text{B}$ и т. д.

В ядерных реакциях выполняются законы сохранения: числа нуклонов, заряда, массы-энергии, импульса. Испускаемые в результате ядер-

ной реакции излучения являются характеристическими для возбужденного ядра, что во многом сходно с излучением атома. Существование характерного набора энергетических состояний в атоме или ядре позволяет использовать излучение для идентификации атома или ядра. В случае активационного анализа характеристиками, позволяющими идентифицировать радиоактивное ядро, могут быть период полураспада, типы испускаемого излучения и энергия квантов характеристического γ -излучения. В противоположность атомам ядерные характеристики обычно сильно различаются для двух изотопов одного и того же элемента; т. е. активационный анализ позволяет определять изотопный состав веществ. Кроме того, ядерные реакции не дают прямой информации о химических связях атомов элементов.

В инструментальном активационном анализе определяемый элемент однозначно идентифицируется по времени полураспада, энергии и другим характеристикам испускаемого возникающими радиоактивными нуклидами излучения, значения которых содержатся в справочных таблицах. Для оптимальной чувствительности анализа желательно получить в образце максимальное количество радиоактивных ядер элементов, подлежащих определению. При возбуждении ядер внешним облучением 50% от максимальной активности достигается после облучения в течение одного периода полураспада и еще около 9% в течение четырех периодов полураспада. Поэтому облучение следует проводить не дольше нескольких периодов полураспада. Вначале регистрируются короткоживущие изотопы, спустя определенный интервал времени – более долгоживущие. В зависимости от вида регистрируемого вторичного излучения (γ -излучение, нейтроны, протоны, α -частицы) применяются различные методы регистрации (см. подразд. 2.3.3). Измерение энергии продуктов ядерных реакций осуществляется полупроводниковыми детекторами.

Другим вариантом активационного анализа является радиохимический, при котором проводится химическое выделение продуктов ядерной реакции и их радиохимический анализ. Этот метод в целом более чувствителен и точен, чем инструментальный, но, в то же время, является трудоемким и длительным. Его можно применять для определения большого числа элементов из одной навески в объектах сложного состава.

Поскольку число распадов в единицу времени (активность радионуклида) пропорционально числу исходных ядер, то измерение активности позволяет осуществлять количественный анализ.

Количественный активационный анализ может быть выполнен абсолютным или относительным способом. В первом случае измеряют абсолютную активность изотопа и, зная факторы, от которых зависит ее значение

(время облучения, число активирующих частиц, проходящих через образец в единицу времени, эффективное сечение ядерной реакции, изотопный состав химического элемента, период полураспада образующегося радиоактивного элемента и время, прошедшее после прекращения облучения до момента измерения активности), рассчитывают исходное содержание анализируемого элемента. Точность абсолютного метода невелика (от 20 до 50%), поэтому он не получил широкого распространения. При относительном способе вместе с исследуемым образцом в строго идентичных условиях облучают специально приготовленный эталон или серию эталонов, содержание определяемого элемента в которых точно известно. Далее сравнивают активность образца с активностями эталонов и, учитывая, что количество радиоактивных атомов, образующихся при облучении, пропорционально содержанию исследуемого элемента, находят требуемое значение (при использовании серии эталонов определение обычно ведут по калибровочной кривой зависимости активности от содержания анализируемого элемента). Если таким путем необходимо определить в образце содержание нескольких элементов, то сравнивают активность каждого из активированных в образце изотопов с активностями соответствующих эталонов.

При возбуждении ядер анализируемого вещества тепловыми нейтронами ($0,005 \text{ эВ} \leq E_n \leq 0,1 \text{ эВ}$), глубоко проникающими практически во весь объем исследуемого вещества (нейтронный активационный анализ), удается определить содержание элементов с очень высокой точностью. Например, содержание золота определяется с точностью $\sim 10^{-10}\%$, платины $\sim 10^{-6}\%$.

Высокая чувствительность активационного анализа с применением тепловых нейтронов обусловлена тем, что сечение взаимодействия нейтронов с ядрами составляет $\sim 10^3\text{--}10^4$ барн, что существенно превышает геометрические сечения (~ 1 барн). Однако активационный анализ с применением нейтронов не обеспечивает чувствительности измерений по глубине. Глубина анализа при этом определяется расстоянием, которое может пройти вторичная частица до выхода из образца, и в зависимости от состава исследуемого вещества может составлять $\sim 1\text{--}10$ мкм.

Развит также активационный анализ, основанный на ядерных реакциях, протекающих под действием γ -излучения.

При облучении исследуемого вещества заряженными частицами с энергиями, достаточными для того, чтобы преодолеть кулоновский барьер, возбуждается целый ряд ядерных реакций, выход которых зависит от дифференциального сечения взаимодействия. При этом ядра со средними и большими значениями Z вследствие кулоновского отталкивания не вступают в реакции с возбуждающими частицами мегаэлек-

тронвольтных энергий. Данный факт в сочетании с тем, что вследствие высоких значений энергетического выхода большинства ядерных реакций испускаемые частицы имеют энергии, намного превышающие энергию возбуждающих частиц, дает возможность бесфоновой регистрации легких элементов, входящих в состав исследуемого вещества. В прил. 13 приведены характеристики ядерных реакций, лежащих в основе определения ядер легких элементов методом инструментального активационного анализа с применением заряженных частиц в качестве анализирующих.

Как и при резерфордовском обратном рассеянии, разность ΔE между энергиями частиц, образовавшимися на поверхности и на некоторой глубине, зависит от потерь энергии налетающей частицы на пути внутрь вещества и от потерь энергии частицей, образовавшейся в результате реакции, на пути наружу. Эта зависимость дает возможность анализа распределения атомов элементов по глубине исследуемого образца. Например, для измерений распределения кислорода по глубине может быть использована реакция $^{16}\text{O}(d, \alpha)^{14}\text{N}$. При низких (< 933 кэВ) энергиях налетающих дейтронов в ходе реакции испускаются α -частицы в основном состоянии, кинетическая энергия которых мала. Поэтому потеря энергии α -частицами на единице длины пути (тормозная способность) достаточно велика, что обеспечивает сильную зависимость энергии α -частиц от толщины проходимого ими слоя вещества и хорошее разрешение анализа по глубине.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Поясните механизмы взаимодействия анализирующих частиц с атомными ядрами, лежащего в основе методов ядерного микроанализа.
2. По каким параметрам осуществляется идентификация элементов, входящих в состав анализируемого вещества, методом инструментального активационного микроанализа?
3. Проанализируйте процесс измерения состава веществ методом активационного ядерного микроанализа на основе обобщенной функциональной схемы измерений (рис. 2.1).

2.6. Основы акустических измерений

2.6.1. Природа и основные характеристики акустического излучения

Акустическое излучение – упругие акустические волны (колебательное движение частиц упругой среды – твердой, жидкой или газообразной, – распространяющееся в среде). Акустическое излучение является предметом изучения акустики. Акустика – область физики,

исследующая упругие колебания и волны в диапазоне от самых низких частот (условно от 0 Гц) до предельно высоких частот (10^{11} – 10^{13} Гц), их взаимодействия с веществом и разнообразные применения.

Уравнение плоской акустической волны, распространяющейся в направлении оси x имеет вид

$$s = s_m \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + \varphi_0 \right] = s_m \sin \left[2\pi \left(\nu t - \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi_0 \right], \quad (2.163)$$

где s – смещение колеблющейся частицы среды от положения равновесия; s_m – амплитуда колебаний; ω – циклическая частота колебаний x – координата в направлении распространения волны (расстояние, отсчитываемое от источника колебаний); c – скорость распространения колебаний (фазовая скорость волны); φ_0 – начальная фаза; ν – частота распространяющихся колебаний; λ – длина волны.

Область пространства, в которой распространяется акустическое излучение, называется акустическим (звуковым) полем. Понятие акустического поля применяется обычно для областей, размеры которых порядка или больше длины звуковой волны.

В жидкостях и газах, которые обладают упругостью при деформации сжатия, распространяются только продольные волны сжатия-разрежения. В неограниченной твердой среде возможно распространение как продольных, так и поперечных (сдвиговых) акустических волн. В ограниченных твердых телах (стержнях, пластинах), представляющих собой твердотельные волноводы, распространяются волны, каждая из которых является комбинацией нескольких продольных и сдвиговых волн. В анизотропных средах (например, в анизотропных кристаллах) свойства акустических волн зависят от направления их распространения. В общем случае в анизотропном кристалле в любом направлении всегда распространяются три волны: квазипродольная и две квазипоперечные, в которых преобладают соответственно продольные и поперечные смещения колеблющихся частиц. Каждая из волн распространяется со своей скоростью. На границе твердого тела с вакуумом, газом, жидкостью или другим твердым телом распространяются поверхностные акустические волны, являющиеся комбинацией неоднородных продольных и сдвиговых волн, амплитуды которых экспоненциально убывают при удалении от границы. Распространение акустических волн в любой упругой среде сопровождается их затуханием вследствие расхождения по мере удаления от источника, рассеяния на неоднородностях среды, поглощения, других взаимодействий со средой.

Акустические волны, воспринимаемые органами слуха, называют звуком. Человек слышит звук в диапазоне частот от 16 Гц до 20 кГц.

Неслышимый звук с частотой ниже 16 Гц называется инфразвуком, выше 20 кГц – ультразвуком, а самые высокочастотные упругие волны в диапазоне частот от 10^9 до 10^{12} – 10^{13} Гц – гиперзвуком. Для анализа и измерений характеристик веществ используется акустическое излучение, соответствующее ультра- и гиперзвуку.

Основными характеристиками акустического излучения являются:

- длина волны, частота, частотный спектр, получаемый в результате разложения излучения на простые гармонические колебания;
- скорость распространения, зависящая от природы и свойств среды;
- колебательная скорость частиц – скорость, с которой движутся по отношению к среде в целом бесконечно малые частицы, колеблющиеся около положений равновесия при прохождении звуковой волны:

$$v = \frac{\partial s}{\partial t}; \quad (2.164)$$

- плотность акустической (звуковой) энергии – энергия колебательного процесса, приходящаяся на единицу объема;

• акустическое (звуковое) давление – переменная часть давления, возникающая в среде при прохождении волны, или добавочное изменение давления по отношению к его среднему значению в среде; звуковое давление в воздухе изменяется от 10^{-5} Па вблизи порога слышимости до 10^3 Па при самых громких звуках;

• уровень акустического (звукового) давления – выраженное в децибелах (дБ) отношение величины данного звукового давления p к пороговому значению звукового давления $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па (число децибел $N = 10 \lg p / p_0$);

• давление акустического (звукового) излучения – постоянное давление, испытываемое телом, находящимся в стационарном акустическом поле; оно пропорционально плотности звуковой энергии и мало по сравнению со звуковым давлением;

• интенсивность звука (сила звука) – средняя по времени энергия, переносимая акустической звуковой волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны. Для плоской синусоидальной бегущей волны

$$I = \frac{p_m v_m}{2} = \frac{p_m^2}{2\rho c}, \quad (2.165)$$

где p_m – амплитуда звукового давления; v_m – амплитуда колебательной скорости; ρ – плотность среды; c – скорость звука в ней. $[I] = \text{Вт/м}^2$;

- уровень интенсивности по шкале децибел

$$N = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \quad (2.166)$$

где I – интенсивность данного звука; $I_0 = 1 \cdot 10^{-12}$ Вт/м².

2.6.2. Принципы преобразований акустического излучения

2.6.2.1. Источники и приемники акустического излучения. Источниками акустического излучения могут быть любые явления, вызывающие локальное изменение давления или механического напряжения в среде. Обширным классом источников и приемников звука, применяемых в измерительной технике, являются электроакустические преобразователи. Они предназначены для преобразования электромагнитной энергии в механическую (энергию акустических колебаний) и обратно. Большинство преобразователей линейны, т. е. удовлетворяют требованию неискаженной передачи сигнала, и обратимы, значит могут работать и как источники, и как приемники излучения.

Работу электроакустических преобразователей – источников акустических сигналов характеризуют: внутренним сопротивлением Z_i , представляющим собой нагрузку (Z_l) для источника электрической энергии; чувствительностью, равной отношению изменения давления p на выходе к соответствующему изменению напряжения U_e или силы тока I_e на входе:

$$S_U = \frac{\Delta p}{\Delta U_e}; \quad S_I = \frac{\Delta p}{\Delta I_e}; \quad (2.167)$$

акустоэлектрическим КПД

$$\eta_{\text{ак/эл}} = \frac{P_{\text{ак}}}{P_{\text{эл}}}, \quad (2.168)$$

где $P_{\text{ак}}$ – активная излучаемая акустическая мощность ($P_{\text{ак}} = Z_n v_0^2$, здесь Z_n – механическое сопротивление акустической нагрузки, т. е. сопротивление, которое оказывает сплошная среда, контактирующая с преобразователем; v_0 – колебательная скорость точек излучающей поверхности); $P_{\text{эл}}$ – активная потребляемая электрическая мощность. Перечисленные параметры зависят от частоты. Давление p на выходе преобразователя и его акустоэлектрический КПД достигают максимальных значений на частотах механического резонанса. Поэтому мощные излучатели выполняются, как правило, резонансными.

Для генерирования высокочастотных ультразвуковых волн в качестве источника электрической энергии, подаваемой на преобразователь-излучатель, используются высокочастотные генераторы электрических сигналов.

Электроакустические преобразователи – приемники акустических сигналов характеризуются входным внутренним сопротивлением Z_e и чувствительностью в режиме холостого хода $S_{x,x} = \Delta U_a / \Delta p$, где U_a – выходное напряжение; p – давление на входе преобразователя. По виду частотных характеристик различают широкополосные и резонансные приемники.

В ультразвуковом диапазоне частот источниками акустических волн являются пластинки, стержни и оболочки различной формы из пьезоэлектрических и магнитострикционных материалов.

Наиболее распространенными электроакустическими преобразователями являются пьезоэлектрические. Пьезоэлектрический преобразователь электрической энергии в механическую (и наоборот) представляет собой один или несколько пьезоэлементов, объединенных в группы и связанных между собой электрически и механически. Действие пьезоэлектрических преобразователей основано на пьезоэлектрическом эффекте. Пьезоэлектрики – кристаллические диэлектрики, в которых при сжатии или растяжении в определенных направлениях из-за смещения атомов с различной электронной плотностью возникает поляризация даже в отсутствие внешнего электрического поля (прямой пьезоэффект). Обратный пьезоэффект – деформация кристалла под действием приложенного электрического поля. Связь между величиной деформации и напряженностью поля в обоих случаях носит линейный характер. К пьезоэлектрическим кристаллам относятся кварц, турмалин, сульфат лития, ниобат лития, танталат лития, дигидрофосфат аммония, различные виды пьезокерамики, а также сегнетоэлектрики – сегнетова соль, титанат бария и др. При изготовлении пьезоэлектрических преобразователей преимущественное распространение получила пьезокерамика из поликристаллических сегнетоэлектриков, например, из цирконата-титаната свинца $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$. Применение пьезокерамических материалов позволяет придать преобразователю при изготовлении необходимую форму, а также использовать оптимальные виды колебаний и тем самым обеспечить высокую эффективность преобразования.

Принцип действия электромеханических пьезопреобразователей-источников акустического излучения основан на обратном пьезоэффекте, а принцип работы преобразователей-приемников излучения – на прямом пьезоэффекте.

Для количественной характеристики пьезоэффекта используется набор пьезоконстант – коэффициентов пропорциональности в соотношениях

между электрическими и механическими величинами. Основными электрическими характеристиками пьезоэлектрика являются поляризованность P и напряженность электрического поля E , механическими – относительная деформация u ($u = \Delta l / l$) и механическое напряжение σ ($\sigma = F / A$, где A – площадь поперечного сечения). Например, поляризованность пьезоэлектрика под действием механического напряжения: $P = d\sigma$, где d – одна из пьезоконстант, называемая пьезомодулем. Полная поляризованность (с учетом действия внешнего электрического поля)

$$P = d\sigma + \varepsilon_0 \chi E, \quad (2.169)$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость пьезоэлектрика.

В случае когда пьезоэлектрик представляет собой монокристалл, его пьезоконстанты зависят от кристаллографического направления, т. е. являются тензорными величинами.

Основными характеристиками пьезопреобразователя являются:

- коэффициент электромеханической связи:

$$K = d \sqrt{\frac{k}{\varepsilon_0 \varepsilon}}, \quad (2.170)$$

где d – пьезомодуль; k – модуль упругости;

- величина, определяющая КПД преобразователя:

$$\eta = \frac{K^2}{\operatorname{tg} \delta}, \quad (2.171)$$

где δ – угол диэлектрических потерь;

- ряд других величин.

КПД пьезоэлектрического преобразователя-излучателя зависит от природы среды, в которой он работает, и от согласования со средой. Его значения составляют от долей процента в газовой среде до 40–49% в жидкости. Удельная акустическая мощность излучателя зависит от его конструкции, рабочей частоты, прочности пьезоэлектрического материала и др.; обычно составляет от 0,1 до 100 Вт/см². Резонансная частота излучателя зависит от конструкции пьезоэлемента и может составлять от нескольких герц до гигагерц.

Чувствительность приемников зависит от параметров пьезоэлектрического материала, конструкции преобразователя, степени его согласования и других параметров. Например, чувствительность пьезоэлектрических приемников при измерениях в воде может принимать значения в пределах от нескольких микровольт на паскаль (мкВ/Па) до нескольких милливольт на паскаль (мВ/Па). Частотный диапазон

широкополосных пьезоэлектрических преобразователей-приемников лежит в пределах от нескольких герц до гигагерц.

На рис. 2.73 приведена схема простейшего пьезоэлектрического преобразователя механического напряжения в электрический сигнал, который может быть использован в качестве приемника акустического излучения. В рассматриваемом преобразователе два пьезокристалла 1 разделены промежуточным электродом 3 из латунной фольги, изолированным от корпуса самими кристаллами. Наружные металлические электроды-обкладки 2 и 4 заземлены. При воздействии силы F вследствие деформации на поверхностях пьезоэлектрика возникают поляризационные заряды. Соответственно на электродах индуцируются заряды, равные по величине и противоположные по знаку поляризационным зарядам. Напряжение U , снимаемое с электродов, является выходным сигналом. При восприятии преобразователем акустических колебаний напряжение на электродах будет изменяться с частотой, равной частоте воспринимаемых механических колебаний. Для увеличения чувствительности пьезопреобразователь изготавливают в виде ряда пластин, соединенных параллельно при помощи металлических обкладок.

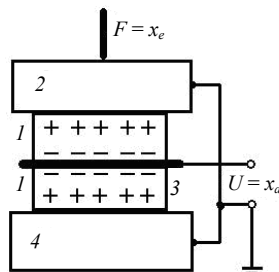


Рис. 2.73. Принцип действия пьезоэлектрического преобразователя:

- 1 – пьезокристаллы;
- 2, 4 – наружные электроды;
- 3 – промежуточный электрод

При снятии механического напряжения поляризационный заряд исчезает. Однако и при воздействии напряжения заряд уменьшается из-за наличия токов утечки. Так как выходная мощность пьезоэлектрических преобразователей очень мала, то к их выходу подключают усилители с возможно большим входным сопротивлением.

При подаче на электроды пьезопреобразователя высокочастотного электрического напряжения будут возбуждаться деформационные колебания пьезокристаллов и преобразователь будет являться источником акустических волн, частота которых определяется частотой электрического напряжения.

Наряду с электроакустическими применяются магнитоакустические преобразователи, принцип действия которых основан на эффекте магнитострикции. Магнитострикция – изменение формы и размеров ферро- или ферритмагнетика при его намагничивании. В таких ферромагнитных материалах, как Fe, Ni, Co, Gd, Tb, Dy, и сплавах,

а также в ферритах относительная деформация $u = \Delta l / l$ при намагничивании составляет 10^{-5} – 10^{-2} .

Основу магнитострикционного преобразователя составляет сердечник из магнитного материала с обмоткой; он является преобразующим звеном. В магнитострикционном преобразователе-излучателе энергия переменного магнитного поля, создаваемого в магнитном сердечнике протекающим по обмотке переменным электрическим током, преобразуется в энергию механических колебаний сердечника. В магнитоакустическом преобразователе-приемнике энергия механических колебаний, возбуждаемых действующей на сердечник внешней переменной силой, преобразуется в энергию магнитного поля, наводящего переменную ЭДС в обмотке.

При регистрации акустического излучения распределение звукового давления по сечению волнового фронта можно проанализировать с помощью электронно-акустического преобразователя. При этом анализируемое акустическое излучение направляется на керамическую пьезоэлектрическую пластинку. Распределение звукового давления по поверхности пластинки преобразуется в соответствующее распределение электрического потенциала на этой поверхности, которое, в свою очередь, считывается сканирующим электронным лучом и преобразуется с помощью осциллографа в видимое изображение акустического поля.

Для изучения ультразвукового поля можно пользоваться и оптическими методами. Ультразвук, распространяясь в какой-либо среде, вызывает изменение оптического показателя ее преломления, что позволяет визуализировать звуковое поле в том случае, если среда прозрачна для света. Совокупность уплотнений и разрежений, сопровождающая распространение ультразвуковой волны, представляет собой своеобразную дифракционную решетку, на которой можно наблюдать дифракцию световых волн.

2.6.2.2. Формирование акустических полей и потоков акустического излучения. Для формирования направленных потоков акустического излучения используются акустические линзы, концентраторы, зеркала и волноводы.

Акустические линзы предназначены для создания сходящихся волновых фронтов акустического излучения сферической или цилиндрической формы. Линза изменяет акустическую длину пути $L = k l$ (где k – волновое число ($k = 2\pi / \lambda$); l – геометрическая длина пути) таким образом, что преобразует плоский или расходящийся фронт в сходящийся. Центр кривизны сходящегося волнового фронта называют геометрическим фокусом, а точку, в которой плотность энергии акустических волн имеет максимальное значение, – волновым фокусом. Для волновых фрон-

тов, форма которых отличается от сферы или прямого кругового цилиндра, положения геометрического и волнового фокусов не совпадают. Расстояние от поверхности фокусирующей системы до фокуса в направлении акустической оси фронта называют фокусным расстоянием.

Акустические линзы изготавливают из твердых материалов, жидкостей и газов. В последних двух случаях используют оболочку, обеспечивающую максимальное прохождение энергии и небольшое отклонение лучей при преломлении. На рис. 2.74 показан принцип фокусировки плоской акустической волны цилиндрической линзой, состоящей из совокупности сходящихся к фокусу F волноводов. Свойства линзы определяются свойствами материала, из которого она изготовлена, и окружающей ее среды, а также формой преломляющих поверхностей линзы. Показатель преломления линзы $n = c_1/c_2$, где c_2 и c_1 – скорости звуковых волн в материале линзы и в окружающей среде соответственно. При $n > 1$ ($c_2 < c_1$) собирающая линза имеет хотя бы одну выпуклую преломляющую поверхность и называется замедляющей.

При $n < 1$ ($c_2 > c_1$) собирающая линза имеет хотя бы одну вогнутую преломляющую поверхность и называется ускоряющей. Материал для линзы должен обладать минимальным коэффициентом затухания, а также волновым сопротивлением, не сильно отличающимся от волнового сопротивления окружающей среды. При фокусировке акустического излучения осуществляется увеличение звукового давления p , колебательной скорости частиц среды v и усиление интенсивности звука I .

Акустический волновод – участок среды, ограниченный в одном или двух направлениях стенками или другими средами, в результате чего устраняется или уменьшается расхождение волн в стороны, так что распространение звука вдоль волновода происходит с меньшим ослаблением, чем в неограниченной однородной среде. Волноводы применяются для передачи энергии акустического излучения от источника на некоторое расстояние или для ввода энергии в какую-либо среду. В качестве акустических волноводов обычно используются трубы, ограниченные звуконепроницаемыми стенками, а также выполненные из твердого материала стержни или пластины.

Волноводы акустических линз изготавливаются из материалов, обладающих высокой скоростью распространения продольных акустических

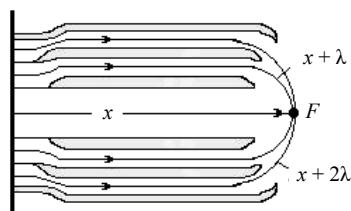


Рис. 2.74. Принцип фокусировки плоской акустической волны волноводной линзой:
 x – расстояние от поверхности фронта волны до фокуса F

волн (сапфир, кварц и др.). В качестве иммерсионных жидкостей, в которые помещается исследуемый объект, используются вода, жидкие металлы (ртуть, галлий и др.), некоторые органические жидкости, а также жидкий гелий. Значения показателя преломления на границах раздела таких сред достигают значительной величины; так, для системы вода – сапфир $n = 7,4$. Для того чтобы уменьшить потери на поглощение звука в иммерсионной жидкости и улучшить разрешающую способность, используются линзы с малыми радиусами кривизны (вплоть до сотен и десятков микрометров для гиперзвуковых частот).

Акустическое зеркало – гладкая поверхность, линейные размеры которой велики по сравнению с длиной λ падающей на нее звуковой волны, формирующая регулярное отражение акустической волны. Поверхность считается гладкой, если ее шероховатость меньше $\lambda / 20$. Свойства акустического зеркала определяются формой отражающей поверхности и коэффициентом отражения, который определяет энергию отраженной волны. Акустические зеркала применяются для изменения направления распространения и фокусировки звуковых волн. Например, плоское зеркало изменяет лишь направление распространения волны. Параболоидное зеркало изменяет направление и вид плоской акустической волны, превращая ее в сходящуюся сферическую волну. Эллипсоидное зеркало превращает расходящуюся сферическую волну в сходящуюся в другом фокусе также сферическую волну.

Акустический концентратор – активная фокусирующая система, предназначенная для увеличения интенсивности акустического излучения путем сосредоточения его энергии в малом объеме. По принципу действия концентраторы подразделяются на фокусирующие и стрежневые, а по интервалу рабочих частот – на низкочастотные и высокочастотные.

Низкочастотный акустический концентратор предназначен для увеличения амплитуды низкочастотных ультразвуковых колебаний (в интервале от 18 до 44 кГц) и представляет собой отрезок стержневого волновода переменного сечения или переменной плотности, присоединяемый к излучателю более широким концом или концом с большей плотностью материала. Действие его основано на увеличении амплитуды колебаний частиц материала вследствие уменьшения поперечного сечения или плотности стержня в соответствии с законом сохранения импульса.

Схема конструкции стержневого концентратора ультразвука приведена на рис. 2.75. Ультразвуковые колебания, возбуждаемые батареей пьезоэлементов 1, излучаются металлической накладкой 3 в виде акустической волны, энергия которой концентрируется сужающимся стержнем 4.

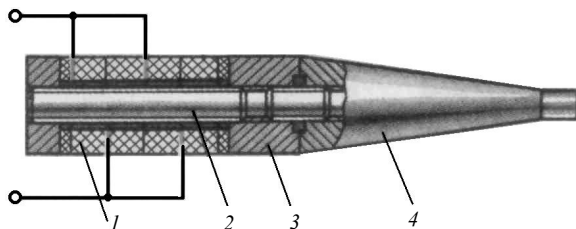


Рис. 2.75. Схема конструкции стержневого акустического концентратора:

1 – пьезоэлементы с токоподводами; 2 – армирующий стержень;
3 – излучающая накладка; 4 – стержень концентратора ультразвука

Высокочастотный акустический концентратор предназначен для увеличения плотности энергии в некоторой части пространства по сравнению с плотностью энергии у поверхности ультразвукового излучателя. Его действие основано на фокусировке звука, поэтому в качестве высокочастотного концентратора могут быть использованы любые фокусирующие устройства – акустические линзы, зеркала, а также специальные концентраторы, которые представляют собой ультразвуковые фокусирующие излучатели, имеющие форму части сферы или прямого кругового цилиндра.

Пример акустического концентратора со сферическим фокусирующим пьезоэлектрическим излучателем 3 приведен на рис. 2.76. Насадка 4, в объеме которой фокусируется акустическое излучение, образует камеру, заполненную контактной жидкостью. Они могут создавать в фокальной области интенсивности до нескольких киловатт на квадратный сантиметр. Сверхмощные концентраторы, в которых используется фокусировка в жидкости или в твердом теле, могут создавать мощность излучения до нескольких мегаватт на квадратный сантиметр.

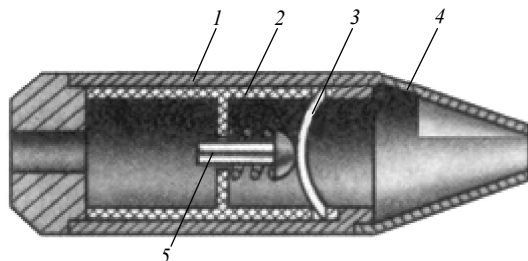


Рис. 2.76. Схема конструкции сферического фокусирующего акустического концентратора:

1 – корпус; 2 – изолирующая втулка; 3 – пьезокерамический сферический фокусирующий излучатель; 4 – насадка; 5 – пружинный контакт

2.6.3. Принципы измерений с применением акустического излучения

Действие приборов и устройств, предназначенных для ультразвуковых исследований и диагностики, основано на способности ультразвуковых волн проникать внутрь вещества без существенного поглощения и отражаться полностью или частично от границ неоднородностей, даже незначительно различающихся по акустическим параметрам, например по акустическому сопротивлению.

Акустическое волновое сопротивление – отношение звукового давления в бегущей волне, распространяющейся в жидкости или газе, к колебательной скорости частиц среды:

$$Z_A = \frac{p}{v} = \rho c, \quad (2.172)$$

где ρ – плотность среды; c – скорость звука в этой среде. Волновое сопротивление не зависит от формы волны и является важнейшей характеристикой среды, определяющей условия отражения и преломления акустических волн на границе раздела сред. При нормальном падении плоской волны на плоскую границу раздела двух сред коэффициент отражения определяется только отношением волновых сопротивлений этих сред; если волновые сопротивления сред равны, то волна проходит границу раздела без отражения. Для акустических волн в твердом теле волновое сопротивление определяется как отношение механического напряжения, взятого с обратным знаком, к колебательной скорости частиц среды:

$$Z_A = \frac{\sigma}{v} = \rho c. \quad (2.173)$$

Комплексное выражение для акустического импеданса имеет вид

$$Z_A = \operatorname{Re} Z_A + \operatorname{Im} Z_A. \quad (2.174)$$

Действительная часть ($\operatorname{Re} Z_A$), или активное акустическое сопротивление, обусловлена диссипацией энергии в самой системе и затратами энергии на излучение звука; мнимая часть ($\operatorname{Im} Z_A$), или реактивное акустическое сопротивление, – реакцией сил упругости или инерции (масс) частиц среды.

В зависимости от способа получения и воспроизведения анализируемого ультразвукового излучения диагностические приборы и устройства разделяют на эхографические и работающие на основе эффекта Доплера.

Эхографические диагностические ультразвуковые приборы, работающие на основе явления акустического эха при отражении звуковых

волн, разделяют на одномерные и двумерные. Одномерные приборы одного типа обеспечивают получение информации о расположении отражающей структуры вдоль фиксированного направления распространения пучка ультразвука. Одномерные приборы другого типа позволяют регистрировать изменение положения отражающих структур во времени. Двумерные приборы обеспечивают получение изображения поперечного сечения исследуемой области в плоскости перемещения (линейного, секторного или сканирования по сложной траектории).

Ультразвуковая диагностическая аппаратура, работающая на основе эффекта Доплера, позволяет регистрировать сдвиг частоты ультразвуковой волны, отраженной от подвижного исследуемого объекта, относительно частоты падающей анализирующей волны. При этом различают: индикаторы, обеспечивающие качественную оценку движения объекта (например, сердцебиений, кровотока), и измерители, которые позволяют измерять и регистрировать скорость и ускорение движения. Эффект Доплера – изменение частоты воспринимаемого звука при относительном движении источника и приемника. При одновременном движении источника и приемника воспринимаемая частота

$$\nu = \nu_0 \frac{1 \pm \nu_{\text{пр}} / c}{1 \mp \nu_{\text{ист}} / c} = \frac{c \pm \nu_{\text{пр}}}{c \mp \nu_{\text{ист}}}. \quad (2.175)$$

При расстановке знаков в выражении (2.175) относительность движения источника и приемника акустических волн учитывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \pm \nu_{\text{пр}} &\rightarrow \frac{\text{приближение}}{\text{удаление}} \text{ приемника;} \\ \mp \nu_{\text{ист}} &\rightarrow \frac{\text{приближение}}{\text{удаление}} \text{ источника.} \end{aligned}$$

При неподвижном приемнике акустического излучения, отраженного от движущейся границы раздела двух сред с различными волновыми сопротивлениями, сдвиг частот $\Delta \nu = |\nu - \nu_0|$ пропорционален скорости движения; если движение направлено в сторону датчика, то частота увеличивается, если от датчика – уменьшается.

Получение увеличенных изображений мелких объектов и их деталей с применением акустического излучения осуществляется методами акустической микроскопии.

Акустическая микроскопия представляет собой совокупность методов визуализации микроструктуры и формы малых объектов с применением ультра- и гиперзвуковых волн. Она включает в себя также методы измерения локальных характеристик упругих и вязких свойств исследуемого объекта и их распределений по его поверхности или внутри объема.

В основе акустической микроскопии лежат явления, обусловленные тем, что акустическое излучение, прошедшее, отраженное от границ раздела или рассеянное отдельными участками объекта, имеет различные характеристики (амплитуду, фазу и др.) в зависимости от локальных вязкоупругих свойств образца. Эти различия позволяют методами визуализации звуковых полей получать акустические изображения на экране дисплея. В зависимости от способа преобразования акустических полей в видимое изображение на экране дисплея различают сканирующую лазерную и сканирующую растровую акустическую микроскопию.

Сканирующая лазерная акустическая микроскопия предназначена для визуализации малых объектов. При облучении плоской акустической волной объекта, помещенного в иммерсионную жидкость, фронт волны после прохождения образца искажается из-за неоднородных фазовых задержек, а амплитуда изменяется в соответствии с неоднородностью коэффициентов отражения и поглощения в объекте. Прошедшая волна падает на свободную поверхность жидкости и создает на ней поверхностный рельеф, соответствующий акустическому изображению объекта. Рельеф считывается световым лучом и воспроизводится на экране дисплея.

Этот метод реализуется в лазерном акустическом микроскопе, принципиальная схема которого представлена на рис. 2.77. Поток акустического излучения от преобразователя-источника 1 через волновод 2 падает на исследуемый объект 3, помещенный в иммерсионную жидкость 4, и после прохождения объекта создает на границе жидкости рельеф. На поверхность жидкости нанесена полупрозрачная пленка, которая под действием излучения деформируется вместе с поверхностью. Луч лазера 5 с помощью сканирующего устройства 6 и зеркала 7 перемещается по поверхности пленки, частично отражаясь от нее. Угол α между падающим и отраженным лучами изменяется от точки к точке в соответствии с рельефом, создаваемым акустической волной. Отраженный луч, пройдя после зеркала 7 линзу 8, падает на преобразователь оптического сигнала 9, преобразующий угловую модуляцию сигнала в амплитудную, и регистрируется фотоприемником 10. Видимое акустическое изображение возникает на экране дисплея 11, развертка которого синхронизирована с движением лазерного луча, а яркость управляется сигналом с фотоприемника. Для сравнения одновременно на другом дисплее 13 получается оптическое изображение объекта за счет регистрации фотоприемником 12 прошедшего лазерного луча.

Используемый в сканирующей лазерной акустической микроскопии способ визуализации не позволяет получать высокие разрешения. Лазерные акустические микроскопы работают на частотах вплоть до не-

скольких сотен мегагерц и дают разрешение до 10 мкм. Одно из достоинств лазерного акустического микроскопа – возможность одновременно получать оптическое и акустическое изображения и сравнивать их.

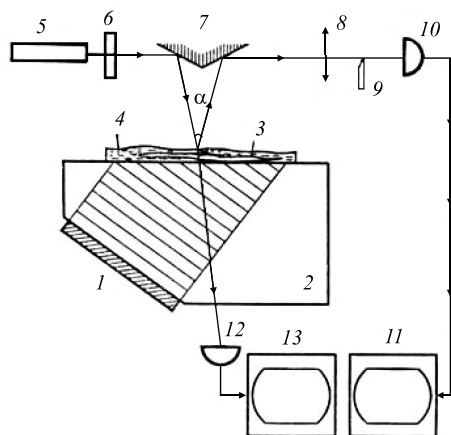


Рис. 2.77. Схема сканирующего лазерного акустического микроскопа:

- 1 – источник акустического излучения; 2 – акустический волновод;
- 3 – исследуемый объект; 4 – иммерсионная жидкость; 5 – лазер;
- 6 – сканирующее устройство; 7 – зеркало; 8 – линза;
- 9 – преобразователь оптического сигнала;
- 10, 12 – фотоприемники; 11, 13 – дисплеи

В сканирующей растровой акустической микроскопии сфокусированный пучок акустического излучения перемещается по объекту, изображение которого воссоздается по точкам в виде раstra. Сфокусированная волна, падая на образец, частично отражается от объекта, частично поглощается и рассеивается в нем, а частично проходит через него. Принимая ту или иную часть излучения, можно судить об акустических свойствах образца в области, размеры которой определяются размерами фокального пятна.

В растровом акустическом микроскопе, схема которого приведена на рис. 2.78, пучок плоских ультразвуковых волн, излучаемых пьезоэлектрическим преобразователем 1, фокусируется акустической линзой 2, которая представляет собой сферическое углубление на границе раздела волновода 3 и иммерсионной жидкости 4. Образец 5 помещается вблизи фокальной плоскости линзы и перемещается параллельно ей по двум осям с помощью механического сканирующего устройства 6. Акустическое излучение после взаимодействия с объектом собирается приемной акустической линзой 7 на пьезоэлектрическом

преобразователе-приемнике 8. Электрический сигнал с преобразователя управляет яркостью электронного луча дисплея, развертка которого синхронизована с движением образца при его сканировании. В результате на экране дисплея 9 возникает акустическое изображение, которое определяется распределением по образцу его физических свойств (упругости, плотности, вязкости, толщины, анизотропии и др.).

В зависимости от того, какая часть излучения после взаимодействия с объектом регистрируется, различают акустические микроскопы «на отражение», «на прохождение», «темного поля».

Выходной сигнал формируется лишь теми лучами, которые проходят через фокус приемной линзы 7 в иммерсионной жидкости и после преломления на ее поверхности падают на преобразователь 8 по нормали.

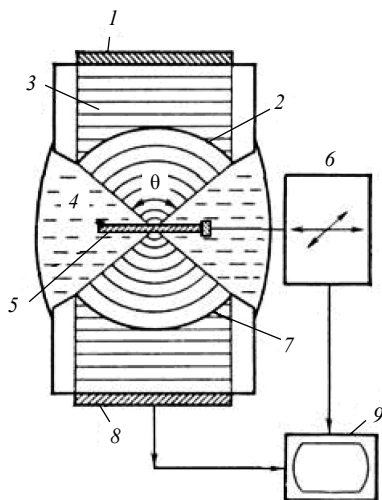


Рис. 2.78. Принципиальная схема растрового сканирующего акустического микроскопа, работающего в режиме «на прохождение»:
1, 8 – электроакустические преобразователи;
2, 7 – акустические линзы; 3 – волновод;
4 – иммерсионная жидкость;
5 – исследуемый объект;
6 – сканирующее устройство; 9 – дисплей

Поэтому для получения изображения в прошедших лучах используется так называемая конфокальная система – пара акустических линз, фокусы которых совмещены, как показано на рис. 2.78.

Акустическая микроскопия «на прохождение» используется для визуализации тонких плоских образцов (пленок, пластинок, срезов биологических тканей и др.). Толщины образцов в этом случае ограничены величиной расстояния между линзами в конфокальной системе, а также поглощением и абберациями сфокусированного ультразвукового пучка в образце и обычно не превышают нескольких десятков значений длин волн на рабочей частоте микроскопа.

В режиме «на отражение» одна и та же линза используется как для получения сфокусированного пучка, так и для приема

акустических волн. Акустическое изображение в режиме «темного поля» создается лучами, рассеянными объектом; для его получения приемную линзу в конфокальной системе отклоняют от акустической оси системы так, чтобы она собирала рассеянные лучи.

Акустический микроскоп обеспечивает увеличение до 10^4 при разрешающей способности до 0,005 мкм (5 нм). Использование акустического микроскопа позволяет получать визуализацию подповерхностной структуры оптически непрозрачных объектов или, наоборот, прозрачных объектов с незначительным оптическим контрастом. Контраст акустических изображений для объектов с акустическими характеристиками, близкими к характеристикам иммерсионной жидкости (например, биологические объекты в воде), создается не только локальными вариациями отражения, поглощения и рассеяния звука в образце, но и неоднородным распределением скорости звука по образцу.

Во многих случаях получение в микроскопе акустических изображений, в отличие от оптических, не требует специальных методов приготовления образцов (для биологических объектов – фиксации и окрашивания, для минералов и сплавов – травления и т. д.), а также позволяет непосредственно наблюдать динамику физических, физико-химических и биологических процессов в исследуемых образцах.

На рис. 2.79 и 2.80 приведены в сравнении акустические (слева) и оптические (справа) микроскопические изображения биологического объекта (среза дермы кожи человека (рис. 2.79)) и неорганических материалов (рис. 2.80).

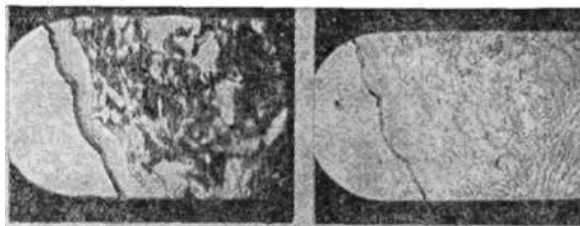


Рис. 2.79. Акустическое (слева) и оптическое (справа) изображения среза дермы кожи человека

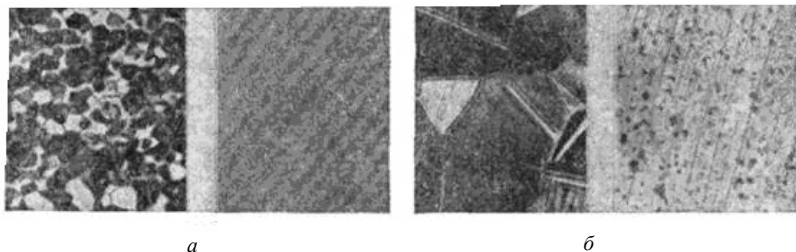


Рис. 2.80. Акустическое (слева) и оптическое (справа) изображения керамики (а) и аустенитной стали (б)

Акустическая микроскопия применяется в материаловедении для изучения структуры минералов, сплавов и кристаллов, а также пленок и различных покрытий; для неразрушающего контроля изделий микроэлектроники; в биологии и медицине – для изучения тканей и клеток и др.

Задания и вопросы для самоконтроля степени усвоения материала

1. Приведите определения акустического излучения и акустического поля.
2. Перечислите основные характеристики акустического излучения. Уясните смысл этих величин.
3. Назовите основные характеристики электроакустических преобразователей-источников акустического излучения. Уясните смысл этих величин.
4. Перечислите основные характеристики электроакустических преобразователей-приемников акустического излучения. Уясните смысл этих величин.
5. Поясните принцип действия пьезоэлектрических электроакустических преобразователей. Перечислите их основные характеристики.
6. Опишите принцип действия магнитострикционных электроакустических преобразователей.
7. Поясните назначение и принцип действия акустических волноводов, линз, концентраторов и зеркал.
8. Поясните принципы измерения с применением акустического излучения. Проанализируйте процесс измерения с применением акустического излучения на основе обобщенной функциональной схемы измерений (рис. 2.1).
9. Поясните смысл акустического волнового сопротивления среды и его составляющих. Какова роль волнового сопротивления в процессе акустических измерений?
10. В чем состоит суть эффекта Доплера? Каковы возможности акустических измерений с применением эффекта Доплера?
11. Поясните принцип действия сканирующих лазерного и растрового акустических микроскопов.
12. Каковы преимущества акустической микроскопии в сравнении с оптической?

Часть 3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

3.1. Методика выполнения заданий

3.1.1. Построение физико-математических моделей и определение статических характеристик измерительных преобразователей

К статическим характеристикам измерительных преобразователей относят: функцию преобразования, передаточный коэффициент, передаточную характеристику, а также чувствительность и порог чувствительности.

Функцией преобразования измерительного преобразователя называют функциональную зависимость выходной величины от входной, описываемую аналитическим выражением

$$x_a = f(x_e) \quad (3.1)$$

или графиком. График функции преобразования $f(x_e)$, отображающий зависимость выходной величины от входной, называется передаточной характеристикой. Если связь между входной и выходной величинами при преобразовании является линейной, то передаточная характеристика измерительного преобразователя представляет собой прямую. Преобразование при этом описывается уравнением

$$x_a = K_p x_e, \quad (3.2)$$

где K_p – передаточный коэффициент измерительного преобразователя.

Чувствительность преобразователя – это величина, показывающая, на сколько изменяется приращение выходной величины x_a при определенном приращении входной величины x_e :

$$S = \frac{\Delta x_a}{\Delta x_e}. \quad (3.3)$$

Порог чувствительности представляет собой наименьшее значение измеряемой величины, которое вызывает заметное для восприятия изменение выходного сигнала средства измерений. Единица измерения порога чувствительности совпадает с единицей соответствующей измеряемой величины. По заметному для восприятия изменению

выходного сигнала $x_a \text{ пор}$ и чувствительности S средства измерений можно рассчитать порог чувствительности $x_e \text{ пор}$:

$$x_e \text{ пор} = S^{-1} \Delta x_a \text{ пор}. \quad (3.4)$$

Для нахождения характеристик конкретного измерительного преобразователя необходимо сформулировать (построить) его физико-математическую модель, т. е. описать аналитически (математическими формулами) физические законы, на основе которых данное устройство действует, с учетом условий измерений.

Рассмотрим несколько простых примеров, иллюстрирующих подходы в определении статических характеристик измерительных преобразователей.

Пример 1. Определение статических характеристик жидкостного термометра

При рассмотрении принципа измерения температуры жидкостным термометром (рис. 3.1) предположим для упрощения, что: при исходной температуре T_0 капиллярная трубка термометра не заполнена рабочей жидкостью (пуста), а его баллончик заполнен жидкостью полностью; объем баллончика V_0 и площадь A сечения капиллярной трубки не изменяются при изменении температуры от исходного значения T_0 до измеряемого T в процессе измерения; силы поверхностного натяжения пренебрежимо малы.

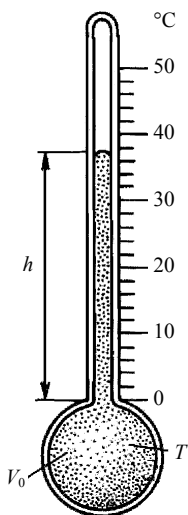


Рис. 3.1. Схематическое изображение жидкостного термометра

Построим физико-математическую модель измерительного преобразователя. Принцип измерения температуры жидкостным термометром основан на явлении теплового расширения жидкости. Входным сигналом такого преобразователя является измеряемая температура T , выходным – высота h столбика жидкости в капиллярной трубке ($x_e = T$, $x_a = h$). При увеличении температуры на $\Delta T = T - T_0$ объем жидкости в термометре увеличивается вследствие теплового расширения на $\Delta V = V_T - V_0$, т. е.

$$V_T = V_0 + \Delta V. \quad (3.5)$$

С другой стороны, зависимость объема жидкости от температуры

$$V_T = V_0(1 + \gamma \Delta T) = V_0 + V_0 \gamma \Delta T, \quad (3.6)$$

где γ – температурный коэффициент объемного расширения жидкости (для ртути $\gamma = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$).

Из (3.5) и (3.6) следует, что объем жидкости в капиллярной трубке изменяется на величину

$$\Delta V = V_0 \gamma \Delta T. \quad (3.7)$$

С другой стороны,

$$\Delta V = \Delta h A, \quad (3.8)$$

где Δh – изменение высоты столбика жидкости в трубке. Поскольку изменение объема жидкости в термометре пропорционально изменению температуры ($\Delta V = \Delta h A \sim \Delta T$) и, соответственно, при постоянном сечении трубки $h \sim T$, то термометр является линейным измерительным преобразователем и его передаточная характеристика линейна.

Из выражений (3.7) и (3.8) получим

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{A} = \frac{V_0 \gamma \Delta T}{A}.$$

Тогда в соответствии с (3.3) чувствительность термометра

$$S = \frac{\Delta x_a}{\Delta x_e} = \frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{V_0 \gamma}{A}. \quad (3.9)$$

Единица измерения $[S] = \text{мм/К}$.

Чувствительность возрастает с увеличением объема V_0 жидкости в баллончике и с уменьшением площади A сечения цилиндрической капиллярной трубки, а также зависит от природы (температурного коэффициента объемного расширения γ) жидкости.

Однако сильно увеличить чувствительность термометра за счет увеличения объема жидкости или уменьшения сечения капиллярной трубки нельзя, так как при этом сам прибор будет влиять на измеряемую величину вследствие увеличения его теплоемкости и преобладания капиллярного эффекта.

Пример 2. Определение статических характеристик U-образного жидкостного манометра

В основе принципа измерений давления жидкостным манометром лежит уравнивание измеряемого давления гидростатическим давлением столба жидкости. В левом колене манометра (рис. 3.2) на нулевом уровне ($h = 0$) на жидкость действует сила измеряемого давления $F_p = pA$, где A – сечение манометрической трубки. Это давление p уравнивается давлением $p_{\text{ж}}$ столбика жидкости высотой h в правом колене: $p = p_{\text{ж}}$.

Входной величиной такого измерительного преобразователя является измеряемое давление p , выходной – высота h столбика ртути в правом колене ($x_e = p$; $x_a = h$).

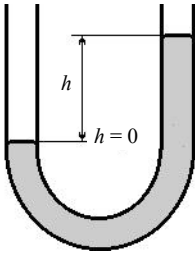


Рис. 3.2. Схема U-образного жидкостного манометра

Поскольку гидростатическое давление $p_{ж} = \rho gh$, то при нарушении равновесия $\Delta p = p - p_{ж} = \rho g \Delta h$. Высота столба жидкости в правом колене манометра прямо пропорциональна величине измеряемого давления: манометр является линейным преобразователем.

Чувствительность манометра

$$S = \frac{\Delta h}{\Delta p} = \frac{1}{\rho g} \quad (3.10)$$

обратно пропорциональна плотности жидкости ($S \sim 1 / \rho$), т. е. зависит от рода жидкости. $[S] = \text{мм/Па}$.

Пример 3. Определение статических характеристик емкостного измерительного преобразователя

Емкостный (конденсаторный) измерительный преобразователь, предназначенный для измерения малых перемещений, состоит из двух пластин площадью A каждая, образующих конденсатор; одна из пластин подвижна (рис. 3.3). Входной величиной является расстояние d между пластинами, которое изменяется при перемещении подвижной пластины ($x_e = d$). Выходной величиной является электрическая емкость конденсатора C ($x_a = C$). Статическая характеристика преобразователя определяется выражением для электроемкости плоского конденсатора:

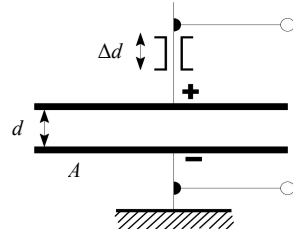


Рис. 3.3. Схема емкостного измерительного преобразователя

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d}, \quad (3.11)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость среды между пластинами (для воздуха $\varepsilon \approx 1$).

Эта характеристика нелинейна (рис. 3.4), и поэтому значение чувствительности преобразователя будет зависеть от значения входного сигнала.

Вначале определим чувствительность преобразователя по аналогии с предыдущими примерами как отношение приращений входной и выходной величин, или разностным методом. Емкость конденсатора в исходном состоянии, когда расстояние между его обкладками $d = d_1$,

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d_1}.$$

При увеличении расстояния между пластинами от d_1 до d_2 на $\Delta d = d_2 - d_1$ емкость уменьшается до

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d_1 + \Delta d}.$$

Изменение емкости конденсатора

$$\begin{aligned} \Delta C &= C_2 - C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d_1 + \Delta d} - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d_1} = \\ &= \varepsilon_0 \varepsilon A \left(\frac{1}{d_1 + \Delta d} - \frac{1}{d_1} \right) = \varepsilon_0 \varepsilon A \left(\frac{d_1 - (d_1 + \Delta d)}{(d_1 + \Delta d) d_1} \right) = \\ &= -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d_1} \frac{\Delta d}{d_1 + \Delta d} = -C_1 \frac{\Delta d}{d_1 + \Delta d}. \end{aligned}$$

Чувствительность преобразователя

$$S_1 = \frac{\Delta x_a}{\Delta x_e} = \frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{C_1}{d_1 + \Delta d} = -\frac{C_1}{d_2}. \quad (3.12)$$

Знак « \rightarrow » в выражении для определения чувствительности означает, что выходной сигнал уменьшается по мере увеличения входного сигнала.

Вследствие нелинейности передаточной характеристики преобразователя его чувствительность зависит от значения входной величины. Поэтому более корректным является определение чувствительности такого преобразователя методом дифференцирования его передаточной характеристики. Дифференцируя выражение (3.11) емкости плоского конденсатора по переменной d , получим

$$\frac{\partial C}{\partial d} = \frac{\partial}{\partial d} \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d} \right) = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d^2}.$$

Для конечных приращений расстояния d и емкости C имеем

$$\Delta C = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d^2} \Delta d.$$

Откуда получим следующее выражение для определения чувствительности преобразователя:

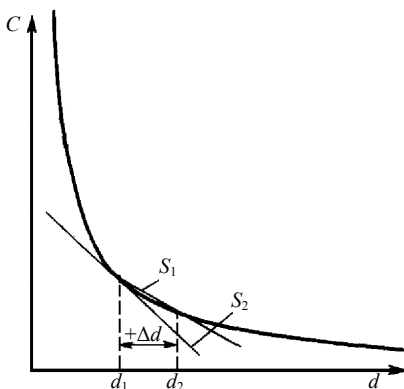


Рис. 3.4. Передаточная характеристика емкостного измерительного преобразователя

$$S = \frac{\Delta x_a}{\Delta x_e} = \frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d^2}. \quad (3.13)$$

Можно проанализировать зависимость чувствительности преобразователя от значения входного сигнала. В точке передаточной характеристики, соответствующей исходному состоянию конденсатора, т. е. при $d = d_1$, $S_2 = -C_1 / d_1$, а в точке характеристики, соответствующей расстоянию между пластинами конденсатора $d = d_2$, $S_3 = -C_1 d_1 / d_2^2$. Эти выражения отличаются от выражения (3.12), полученного разностным методом. Наклонные отрезки на рис. 3.4 иллюстрируют различия в определении значений чувствительности S_1 по секущей линии и S_2 — по касательной.

Пример 4. Определение статических характеристик ареометра

Определим передаточную характеристику, чувствительность и порог чувствительности ареометра, предназначенного для измерения плотности ρ жидкости (рис. 3.5). Пусть масса ареометра равна m . В нижней

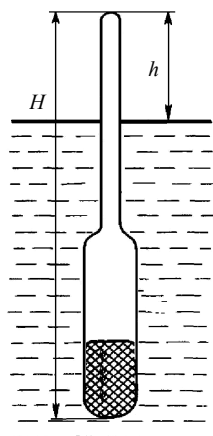


Рис. 3.5. Схематическое изображение ареометра

части ампулы, которая имеет площадь поперечного сечения A , находится груз, а удлиненная верхняя часть ампулы проградуирована в единицах плотности. Высота ареометра H . Выходным сигналом является длина h верхней части ампулы, выступающей над поверхностью жидкости. Чувствительность ареометра определяется соотношением $S = \Delta h / \Delta \rho$.

Сила тяжести ареометра уравнивается выталкивающей силой:

$$mg = \rho A(H - h)g.$$

Отсюда $m = \rho A(H - h)$, и

$$(H - h) = \frac{m}{\rho A}. \quad (3.14)$$

Поскольку $(H - h) \sim 1 / \rho$, то передаточная характеристика является нелинейной (может быть графически представлена в виде гиперболы). Поэтому чувствительность ареометра необходимо определять методом дифференцирования передаточной характеристики.

Дифференцируя выражение (3.14), получим

$$-dh = \frac{m}{A} \left(-\frac{d\rho}{\rho^2} \right).$$

Для конечного изменения высоты h можно записать

$$\Delta h = \frac{m}{\rho^2 A} \Delta \rho.$$

Отсюда чувствительность ареометра

$$S = \frac{\Delta h}{\Delta \rho} = \frac{m}{\rho^2 A}. \quad (3.15)$$

Чувствительность прямо пропорциональна массе ареометра ($S \sim m$) и обратно пропорциональна площади поперечного сечения ампулы ($S \sim 1/A$). Однако достичь повышения чувствительности путем значительного увеличения массы и уменьшения площади сечения невозможно.

Оценим значение чувствительности ареометра. Если $m = 100$ г, $A = 1$ см², то чувствительность при измерении плотности водных растворов (плотность воды $\rho = 1$ г/см³) составит

$$S = \frac{100 \text{ г}}{(1 \text{ г/см}^3)^2 \cdot 1 \text{ см}^2} = 100 \text{ см/(г/см}^3\text{)}.$$

Если предположить, что еще различимое человеком изменение глубины погружения ареометра в воду составляет 0,5 мм, то порог чувствительности ареометра в воде

$$\rho_{\text{пор}} = \frac{\Delta h_{\text{пор}}}{S};$$

$$\rho_{\text{пор}} = \frac{0,05 \text{ см}}{100 \text{ см/(г/см}^3\text{)}} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3.$$

Относительный порог чувствительности $x_e^*_{\text{пор}} = x_{e\text{пор}} / x_e$. Для ареометра $\rho^*_{\text{пор}} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3 / 1 \text{ г/см}^3 = 5 \cdot 10^{-4}$.

Пример 5. Определение статических характеристик прибора для измерения pH растворов (pH-метра)

Первичный измерительный преобразователь pH-метра гальванического принципа действия состоит из стеклянного электрода 2, заполненного образцовым раствором с известным значением pH, и электрода сравнения 4 (рис. 3.6).

При погружении электродов в исследуемый раствор вследствие электрохимических реакций возникает ЭДС гальванической цепи и между электродами появляется соответствующая разность потенциалов, зависящая от активности ионов водорода в исследуемом растворе.

Напряжение U_{pH} , пропорциональное значению водородного показателя, усиливается с помощью усилителя 5 и измеряется вольтметром 6. Входной величиной первичного преобразователя является значение водородного показателя pH, выходной величиной – напряжение U_{pH} . Усилитель 5 и вольтметр 6 являются вторичными измерительными преобразователями pH-метра (прибора).

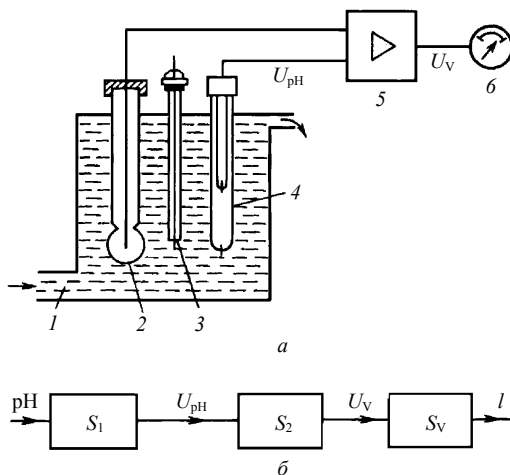


Рис. 3.6. Схематическое изображение pH-метра (а) и соответствующая схема передачи сигналов (б):

1 – кювета с исследуемым раствором; 2 – стеклянный электрод;
3 – термометр; 4 – электрод сравнения; 5 – усилитель; 6 – вольтметр

Определим чувствительность первичного гальванического преобразователя. Воспользуемся зависимостью гальванического напряжения U_{pH} от концентрации ионов водорода в водном растворе c_{H} или от значения pH:

$$\text{pH} = -\lg c_{\text{H}}. \quad (3.16)$$

В соответствии с уравнением Нернста гальваническое напряжение, возникающее в результате электродной реакции в растворе (электродный потенциал), определяется следующим образом:

$$U = U_0 + \frac{RT}{nF} \ln(fc), \quad (3.17)$$

где $R = 8,313$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – термодинамическая температура раствора; n – валентность ионов; $F = 96\,552$ Кл/моль – постоянная Фарадея; f – коэффициент активности раствора; c – концентрация ионов.

Для ионов водорода ($n = 1$) в сильно разбавленном ($f = 1$) растворе

$$U_{\text{pH}} = U_0 + \frac{RT}{F} \ln c_{\text{H}},$$

или, после подстановки значений констант,

$$U_{\text{pH}} = U_0 + 8,61 \cdot 10^{-5} T \cdot \ln c_{\text{H}}.$$

С учетом, что $\ln x = 2,3026 \lg x$, и соотношения (3.16)

$$U_{\text{pH}} = U_0 - 1,983 \cdot 10^{-4} T \cdot (\text{pH}). \quad (3.18)$$

Из (3.18) следует, что первичный преобразователь pH-метра является линейным. Изменению водородного показателя на $\Delta(\text{pH})$ соответствует изменение напряжения

$$\Delta U_{\text{pH}} = 1,983 \cdot 10^{-4} T \cdot \Delta(\text{pH}). \quad (3.19)$$

Чувствительность первичного преобразователя

$$S_1 = \frac{\Delta U_{\text{pH}}}{\Delta(\text{pH})}; \quad S_1 = 1,983 \cdot 10^{-4} T \text{ В}/\Delta(\text{pH}). \quad (3.20)$$

При температуре раствора $T = 293 \text{ К}$ $S_1 = 0,058 \text{ В}/\Delta(\text{pH}) = 58 \text{ мВ}/\Delta(\text{pH})$ (милливольт на единицу изменения pH).

Определим характеристики вторичных измерительных преобразователей pH-метра: усилителя и вольтметра.

Пусть диапазон измерений стрелочного вольтметра pH-метра составляет от 0 до 50 В, а длина его шкалы $l = 150 \text{ мм}$. Налагаемое условие к показаниям pH-метра: изменение значения pH на единицу (например, от $\text{pH}_1 = 5$ до $\text{pH}_2 = 6$) должно вызывать отклонение стрелки вольтметра на всю шкалу до ее предела, т. е. общая чувствительность pH-метра должна быть $S_{\text{pH}} = 150 \text{ мм}/\Delta(\text{pH})$.

Чувствительность вольтметра $S_V = 150 \text{ мм} / 50 \text{ В} = 3 \text{ мм}/\text{В}$.

Определим необходимую чувствительность усилителя S_2 . Поскольку общая чувствительность прибора равна произведению чувствительностей последовательно составляющих его звеньев ($S_{\text{pH}} = S_1 S_2 S_V$), то чувствительность усилителя $S_2 = S_{\text{pH}} / (S_1 S_V)$. $S_2 = 150 / (58 \cdot 3) = 0,86 \text{ В}/\text{мВ}$. Следовательно, коэффициент усиления K_y усилителя должен быть равен значению

$$K_y = 0,86 \text{ В}/\text{мВ} = 860 \text{ мВ}/\text{мВ} = 860.$$

3.1.2. Построение блок-схем преобразования сигналов в средствах измерений

Процесс преобразования и передачи сигналов в средствах измерений изображается графически в виде блок-схем. Основные элементы передачи и преобразования сигналов обозначаются на блок-схемах специальными

графическими символами (см. табл. 1.1). Применение блок-схем преобразования сигналов является одним из методов описания принципа действия и инструментом исследования средств измерений. Принципы построения блок-схем и расчета передаточных характеристик средств измерений на основе блок-схем подробно изложены в подразд. 1.2.3, 1.2.4, 1.2.8, а также в пособии [1], с. 61–72, 158–159.

Рассмотрим несколько примеров составления блок-схем преобразования сигналов в измерительных устройствах.

Пример 6. Построение блок-схемы преобразования сигналов в пружинных весах

Входной величиной измерительного устройства является масса взвешиваемого груза ($x_e = m$), выходной величиной – смещение s стрелочного указателя вследствие деформации пружины ($x_a = s$). В пределах упругости выполняется закон Гука: $F_{\text{упр}} = ks$, где $F_{\text{упр}}$ – сила упругости; k – коэффициент упругости пружины. На взвешиваемый груз массой m действует сила тяжести $F = mg$, где g – ускорение свободного падения. Пружина весов растягивается до тех пор, пока сила тяжести груза не уравновешивается силой упругости пружины. Физико-математическая модель принципа измерений массы пружинными весами в статическом режиме может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} F = mg, \\ F_{\text{упр}} = ks, \\ F = F_{\text{упр}}. \end{cases}$$

Сила тяжести F является выходным сигналом первого передаточного звена с постоянным коэффициентом передачи g . Она вызывает удлинение пружины до тех пор, пока не уравновесится противоположно направленной силой упругости пружины $F_{\text{упр}}$, т. е. пока их разность ΔF не станет равной нулю. При этом масса оказывается пропорциональной смещению указателя весов.

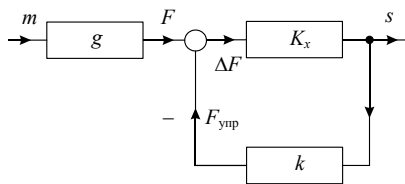


Рис. 3.7. Блок-схема преобразования сигналов при определении массы пружинными весами

Соответствующая блок-схема преобразования и передачи сигналов приведена на рис. 3.7, где K_x – общий передаточный коэффициент весов как измерительного устройства. Сравнение силы тяжести F и силы упругости $F_{\text{упр}}$ отображается на блок-схеме узлом суммирования.

Пример 7. Построение блок-схем преобразования сигналов в U-образном ртутном манометре

Измеряемое манометром (рис. 3.8) избыточное (сверх атмосферного) давление p уравнивается давлением силы тяжести F столба ртути высотой h (гидростатическим давлением $p_{\text{Hg}} = \rho gh$). Столбик ртути поднимается на высоту h до тех пор, пока сила тяжести $F = mg$ не уравнивает силу F_p , создаваемую измеряемым давлением.

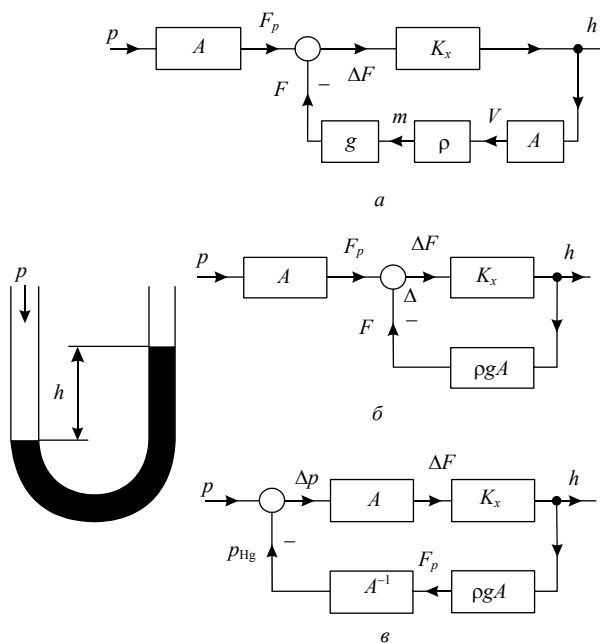


Рис. 3.8. U-образный манометр и возможные блок-схемы преобразования сигналов, отображающих его действие

В свою очередь сила тяжести $F = mg = \rho Vg = \rho Ahg$, где $m = \rho V$ – масса столбика ртути высотой h ; ρ – плотность ртути; $V = Ah$ – объем столбика ртути; A – площадь сечения манометрической трубки; g – ускорение свободного падения.

Преобразование сигнала давления p в сигнал h может осуществляться (см. рис. 3.8) и в соответствии с блок-схемой *a*, а также общим передаточным звеном (блок-схема *б*). Работу манометра можно представить и как уравнивание измеряемого давления p гидростатическим давлением столбика ртути p_{Hg} (блок-схема *в*).

Пример 8. Построение блок-схем преобразования сигналов в электрической цепи

На рис. 3.9 приведена схема электрической цепи (а), состоящей из четырех резисторов, которую можно рассматривать как преобразователь электрического напряжения, а также два варианта (б и в) блок-схемы сигналов этой цепи. Входной величиной является напряжение U_e , а выходной – падение напряжения на резисторе R_4 , т. е. $U_a = U_4$. Цепь представляет собой преобразователь постоянного напряжения U_e в напряжение U_a .

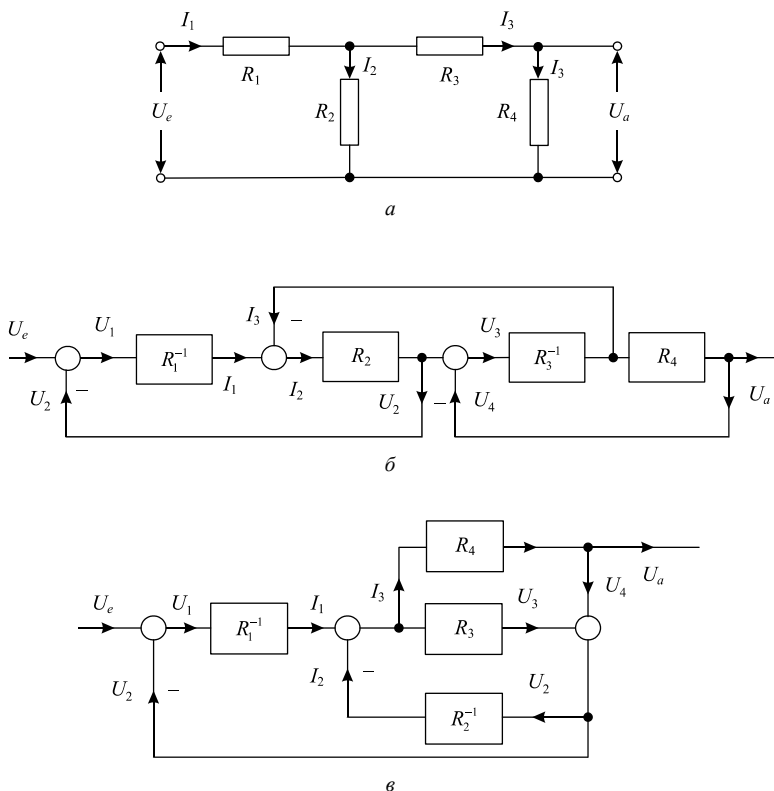


Рис. 3.9. Электрическая цепь (а) и соответствующие блок-схемы (б), (в) преобразования сигналов

Напряжение U_e , подаваемое на вход, создает в цепи ток силой I_1 , который протекает через резистор с сопротивлением R_1 , а затем разветвляется на токи I_2 и I_3 . Входное напряжение перераспределяется ме-

жду резистором R_1 и остальным участком цепи: $U_e = U_1 + U_2$; в свою очередь, падение напряжения на резисторе R_2 равно сумме падений напряжения на последовательно соединенных резисторах R_3 и R_4 : $U_2 = U_3 + U_4$. Соотношения между токами и напряжениями на различных участках цепи можно представить системой уравнений

$$\begin{cases} I_1 = I_2 + I_3, \\ U_e = U_1 + U_2, \\ U_2 = U_3 + U_4, \\ U_4 = U_a, \\ U_i = I_i R_i, \end{cases} \quad (3.21)$$

которые отображают физико-математическую модель преобразователя.

Падение напряжения U_1 на резисторе R_1 : $U_1 = U_e - U_2$, что отражено на блок-схеме *б* соответствующим узлом суммирования. При этом ток I_1 равен $U_1 R_1^{-1}$, а R_1^{-1} является передаточным коэффициентом первого из звеньев. По току I_1 можно определить силу тока I_2 (второй узел суммирования) и падение напряжения U_2 (звено с передаточным коэффициентом R_2). При переходе от одного звена к другому сигнал силы тока преобразуется в сигнал напряжения и наоборот.

Если вначале из силы тока I_1 выделить силу тока I_3 , т. е. во втором (среднем) узле суммирования поменять местами токи I_2 и I_3 , то блок-схема *б* преобразуется в блок-схему *в*. Обе эти блок-схемы воспроизводят одни и те же зависимости токов и напряжений: $I_1 = I_2 + I_3$, $U_e = U_1 + U_2$ и $U_2 = U_3 + U_4$, а также закон Ома для участков цепи постоянного тока. В каждую из блок-схем входят по три узла суммирования и по четыре передаточных звена.

3.1.3. Определение статических и динамических характеристик средств измерений на основе блок-схем сигналов

По блок-схемам выясняются взаимосвязи между сигналами измерительной информации на различных этапах преобразования входной величины в выходную, что позволяет проанализировать процесс измерений. Кроме того, на основе блок-схем выводятся аналитические выражения для определения функций преобразования средств измерений, работающих как в статическом, так и в динамическом режимах. При статических измерениях определяется передаточный коэффициент K (см. формулу (1.18)), в случае динамических измерений – передаточная

функция $G(p)$ (формула (1.55)). Алгоритм для вычисления любой из этих характеристик через значения путей и контуров имеет вид

$$K_p = \frac{\sum_{k=1}^n P_k (1 - \sum_{i=1}^r S_i + \sum_{(i,j)=1}^s S_{(i,j)} - \dots)}{1 - \sum_{i=1}^m S_i + \sum_{(i,j)=1}^p S_{(i,j)} - \dots}, \quad (3.22)$$

где P_k – значения путей; S_i – значения контуров первого порядка; $S_{(i,j)}$ – значения контуров второго порядка; n – количество путей; m – количество контуров первого порядка; p – число контуров второго порядка; r – число контуров первого порядка, не относящихся к одному пути; s – число контуров второго порядка, не относящихся к одному пути; * – суммы контуров, не связанных на данном пути.

Получим выражения для расчета передаточного коэффициента преобразователя постоянного электрического напряжения, электрическая схема которого приведена на рис. 3.9, а.

Пример 9. Определение передаточного коэффициента преобразователя постоянного электрического напряжения

Блок-схема, представленная на рис. 3.9, б, включает один путь ($P_k = P_1$) и три контура ($S_i = S_1, S_2, S_3$), а также один контур второго порядка ($S_{(i,j)} = S_{(1,2)}$):

$$P_1: U_e \rightarrow R_1^{-1} \rightarrow R_2 \rightarrow R_3^{-1} \rightarrow R_4 \rightarrow U_a; \quad \left(R_1^{-1} R_2 R_3^{-1} R_4 = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} \right);$$

$$S_1: R_1^{-1} \rightarrow R_2; \quad \left(-R_1^{-1} R_2 = -\frac{R_2}{R_1} \right);$$

$$S_2: R_3^{-1} \rightarrow R_4; \quad \left(-R_3^{-1} R_4 = -\frac{R_4}{R_3} \right);$$

$$S_3: R_2 \rightarrow R_3^{-1}; \quad \left(-R_2 R_3^{-1} = -\frac{R_2}{R_3} \right);$$

$$S_{(1,2)} = S_1 S_2; \quad \left(\left(-\frac{R_2}{R_1} \right) \left(-\frac{R_4}{R_3} \right) = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} \right).$$

В скобках справа приведены значения соответствующих путей и контуров.

Схема на рис. 3.9, в включает один путь ($P_k = P_1$) и четыре контура ($S_i = S_1, S_2, S_3, S_4$):

$$P_1: U_e \rightarrow R_1^{-1} \rightarrow R_4 \rightarrow U_a; \quad \left(R_1^{-1} R_4 = \frac{R_4}{R_1} \right);$$

$$\begin{aligned}
 S_1: R_1^{-1} &\rightarrow R_3; & \left(-R_1^{-1} R_3 = -\frac{R_3}{R_1} \right); \\
 S_2: R_1^{-1} &\rightarrow R_4; & \left(-R_1^{-1} R_4 = -\frac{R_4}{R_1} \right); \\
 S_3: R_3 &\rightarrow R_2^{-1}; & \left(-R_3 R_2^{-1} = -\frac{R_3}{R_2} \right); \\
 S_4: R_4 &\rightarrow R_2^{-1}; & \left(-R_4 R_2^{-1} = -\frac{R_4}{R_2} \right).
 \end{aligned}$$

Для блок-схемы, представленной на рис. 3.9, в, включающей пути и контуры только первого порядка, в соответствии с формулой (3.22) передаточный коэффициент

$$\begin{aligned}
 K_p &= \frac{R_4 / R_1}{1 + R_3 / R_1 + R_4 / R_1 + R_3 / R_2 + R_4 / R_2} = \\
 &= \frac{R_2 R_4}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_2 R_4 + R_1 R_3 + R_1 R_4}.
 \end{aligned}$$

Для блок-схемы, приведенной на рис. 3.9, б, в соответствии с (3.22)

$$\begin{aligned}
 K_p &= \frac{(R_2 R_4) / (R_1 R_3)}{1 + R_2 / R_1 + R_4 / R_3 + R_2 / R_3 + [(-R_2 / R_1)(-R_4 / R_3)]} = \\
 &= \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3 + R_2 R_3 + R_1 R_4 + R_1 R_2 + R_2 R_4}.
 \end{aligned}$$

Поскольку различные блок-схемы, представленные на рис. 3.9, б и в, отображают действие одного и того же преобразователя, то выражения для расчета передаточного коэффициента K_p , полученные на основе этих блок-схем, совпадают. При заданных значениях сопротивлений R_i можно вычислить значение коэффициента K_p .

Пример 10. Определение передаточной функции преобразователя переменного электрического напряжения

Определение динамических характеристик средств измерений на основе блок-схем сигналов можно осуществлять практически так же, как и статических. При этом строится физико-математическая модель и блок-схема сигналов измерительного устройства. Нелинейные передаточные звенья с передаточными функциями дифференцирования и интегрирования можно в случае периодических сигналов заменить с использованием комплексного операторного представления линейными. Далее

можно с применением понятий путей P , контуров S и их значений по формуле (3.23), аналогичной (3.22), рассчитать передаточную функцию $G(p)$:

$$G(p) = \frac{\sum_{k=1}^n P_k (1 - \sum_{i=1}^r S_i + \sum_{(i,j)=1}^s S_{(i,j)} - \dots)}{1 - \sum_{i=1}^m S_i + \sum_{(i,j)=1}^p S_{(i,j)} - \dots}, \quad (3.23)$$

а затем с использованием замены $p = i\omega$ и комплексный коэффициент передачи $G(i\omega)$ измерительного устройства.

В тех случаях, когда в состав средств измерений входят преобразователи на основе электрических цепей переменного тока, содержащие реактивные элементы – конденсаторы, которые характеризуются электроемкостью, и катушки индуктивности, необходимо учитывать комплексный характер реактивных сопротивлений конденсаторов и катушек. Использование оператора комплексной частоты $p = i\omega$ позволяет в случае синусоидального переменного тока перейти от нелинейных передаточных функций дифференцирования и интегрирования к линейным преобразованиям умножения и деления. Линейные коэффициенты преобразования синусоидального переменного тока в напряжение и напряжения в ток на катушке индуктивности имеют вид (см. формулу (1.57))

$$G_{I \rightarrow U}^L = -pL \text{ и } G_{U \rightarrow I}^L = -\frac{1}{pL}, \quad (3.24)$$

а на конденсаторе (формула (1.59)) выглядят следующим образом:

$$G_{I \rightarrow U}^C = \frac{1}{pC} \text{ и } G_{U \rightarrow I}^C = pC. \quad (3.25)$$

Причем если в состав электрической цепи переменного тока входят активные элементы (резисторы R_i) и реактивные элементы одного типа (только индуктивности L_i), то коэффициенты преобразования $G_{I \rightarrow U}^L$ и $G_{U \rightarrow I}^L$ можно брать со знаком «+». Знак «-» обязателен в том случае, когда в цепи наряду с активными элементами имеются реактивные элементы разных типов (конденсаторы и катушки индуктивности), напряжения на которых изменяются в противофазе.

Рассмотрим в качестве примера преобразователь переменного электрического напряжения, электрическая схема которого приведена на рис. 3.10, а. Входное напряжение U_e создает в цепи ток силой I_1 , который протекает через резистор с сопротивлением R_1 , а затем разветвляется на токи I_2 и I_3 . Переменный ток силой I_2 протекает через катушку индуктивности и конденсатор электроемкостью C_1 , а ток силой I_3 – через соединенные последовательно конденсатор C_2 , резистор R_2 и конденсатор C_3 . Входное напряжение перераспределяется между резистором R_1

и остальным участком цепи: $U_e = U_1 + U_2$; в свою очередь, падения напряжения на участках с токами I_2 и I_3 одинаковы ($U_3 = U_2$) и перераспределяются между элементами цепи, входящими в состав этих участков. Выходное напряжение U_a снимается с соединенных последовательно резистора R_2 и конденсатора C_3 .

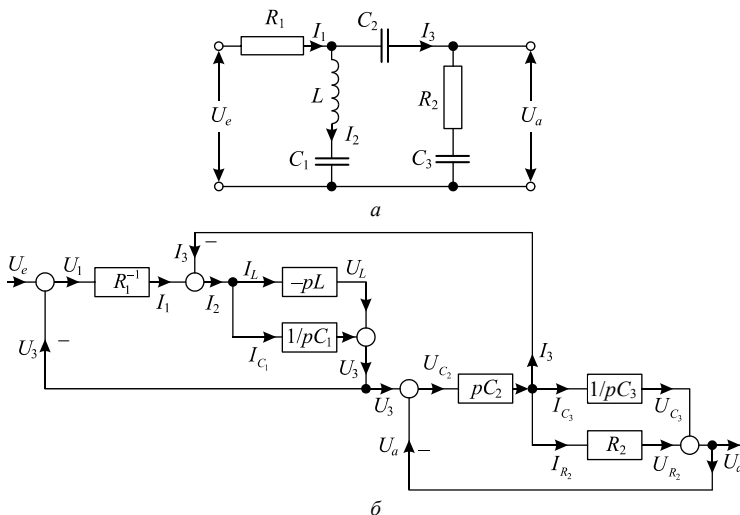


Рис. 3.10. Электрическая цепь (а) и соответствующая блок-схема (б) преобразования сигналов

Соотношения между токами и напряжениями на различных участках цепи можно представить системой уравнений

$$\begin{cases} I_1 = I_2 + I_3, \\ I_2 = I_L = I_{C_1}, \\ I_3 = I_{C_2} = I_{R_2} = I_{C_3}, \\ U_e = U_1 + U_2, \\ U_2 = U_L + U_{C_1}, \\ U_3 = U_2, \\ U_3 = U_{C_2} + U_a, \\ U_a = U_{R_2} + U_{C_3}, \\ U_i = I_i Z_i, \end{cases} \quad (3.26)$$

отображающих физико-математическую модель преобразователя.

На основании физико-математической модели построим соответствующую блок-схему преобразования сигналов (рис. 3.10, б), учитывая преобразования на каждом из элементов электрической цепи. Узлы суммирования блок-схемы отображают соответственно четвертое, первое, пятое, седьмое и восьмое уравнения системы (3.26). Узлы разветвления отображают равенства сил токов и напряжений, определяемые вторым, шестым и третьим уравнениями системы (3.26) соответственно.

Укажем передаточные коэффициенты каждого из элементов, входящих в состав преобразователя. При этом воспользуемся законом Ома для участка электрической цепи и соотношениями (3.24), (3.25).

Получим выражение для определения передаточной функции $G(p)$ преобразователя в соответствии с алгоритмом (3.23). Для этого определим пути и контуры блок-схемы (рис. 3.10, б) и их значения. Блок-схема преобразования сигналов включает 4 пути, 6 контуров первого порядка и 4 контура второго порядка:

$$P_1: U_e \rightarrow R_1^{-1} \rightarrow -pL \rightarrow pC_2 \rightarrow R_2 \rightarrow U_a;$$

$$\left(R_1^{-1}(-pL)pC_2R_2 = -\frac{p^2LC_2R_2}{R_1} \right);$$

$$P_2: U_e \rightarrow R_1^{-1} \rightarrow (pC_1)^{-1} \rightarrow pC_2 \rightarrow R_2 \rightarrow U_a;$$

$$\left(R_1^{-1}(pC_1)^{-1}pC_2R_2 = \frac{C_2R_2}{C_1R_1} \right);$$

$$P_3: U_e \rightarrow R_1^{-1} \rightarrow -pL \rightarrow pC_2 \rightarrow (pC_3)^{-1} \rightarrow U_a;$$

$$\left(R_1^{-1}(-pL)pC_2(pC_3)^{-1} = -\frac{pLC_2}{R_1C_3} \right);$$

$$P_4: U_e \rightarrow R_1^{-1} \rightarrow (pC_1)^{-1} \rightarrow pC_2 \rightarrow (pC_3)^{-1} \rightarrow U_a;$$

$$\left(R_1^{-1}(pC_1)^{-1}pC_2(pC_3)^{-1} = \frac{C_2}{pR_1C_1C_3} \right);$$

$$S_1: R_1^{-1} \rightarrow (pC_1)^{-1};$$

$$\left(-\frac{1}{pC_1R_1} \right);$$

$$S_2: R_1^{-1} \rightarrow (-pL);$$

$$\left(\frac{pL}{R_1} \right);$$

$$S_3: (-pL) \rightarrow pC_2;$$

$$(p^2LC_2);$$

$$S_4: (pC_1)^{-1} \rightarrow pC_2; \quad \left(-\frac{C_2}{C_1} \right);$$

$$S_5: pC_2 \rightarrow R_2; \quad (-pC_2R_2);$$

$$S_6: pC_2 \rightarrow \frac{1}{pC_3}; \quad \left(-\frac{pC_2}{pC_3} = -\frac{C_2}{C_3} \right);$$

$$S_{(1\ 5)}: \quad \left[\left(-\frac{1}{pC_1R_1} \right) (-pC_2R_2) = \frac{C_2R_2}{C_1R_1} \right];$$

$$S_{(1\ 6)}: \quad \left[\left(-\frac{1}{pC_1R_1} \right) \left(-\frac{C_2}{C_3} \right) = \frac{C_2}{pC_1R_1C_3} \right];$$

$$S_{(2\ 5)}: \quad \left[\left(\frac{pL}{R_1} \right) (-pC_2R_2) = -\frac{p^2LC_2R_2}{R_1} \right];$$

$$S_{(2\ 6)}: \quad \left[\left(\frac{pL}{R_1} \right) \left(-\frac{C_2}{C_3} \right) = -\frac{pLC_2}{R_1C_3} \right].$$

В скобках справа указаны значения путей и контуров.

Передаточная функция преобразователя

$$G(p) = \frac{-\frac{p^2LC_2R_2}{R_1} + \frac{C_2R_2}{C_1R_1} - \frac{pLC_2}{R_1C_3} + \frac{C_2}{pC_1C_3}}{1 + \frac{1}{pC_1R_1} - \frac{pL}{R_1} - p^2LC_2 + \frac{C_2}{C_1} + pC_2R_2 + \frac{C_2}{C_3} + \frac{C_2R_2}{C_1R_1} - \frac{C_2}{pC_1R_1C_3} - \frac{p^2LC_2R_2}{R_1} - \frac{pLC_2}{R_1C_3}}.$$

Пример 11. Определение динамических характеристик пружинных весов

В качестве примера продолжим рассмотрение процесса измерения массы пружинными весами (рис. 3.11).

В общем случае процесс взвешивания осуществляется с временной задержкой, т. е. в динамическом режиме. Для того чтобы описать динамический режим измерения и временную задержку при взвешивании, необходимо записать уравнение динамики измерительного преобразователя. При этом помимо силы тяжести груза mg и силы упругости пружины ($F_{\text{упр}} = -ks$) нужно учесть силу трения (силу сопротивления среды). Сила сопротивления пропорциональна скорости v движения взвешиваемого груза ($F_{\text{сопр}} = -bv = -b(ds/dt)$), где b — коэффициент сопротивления среды.

Уравнение динамики движения взвешиваемого груза:

$$-b \frac{ds}{dt} - ks + (m + m_w)g = m_0 \frac{d^2s}{dt^2}, \quad (3.27)$$

где s – удлинение пружины; k – коэффициент упругости пружины; $m + m_w = m_0$ – общая масса взвешиваемого груза (m) и самой измерительной системы (m_w); g – ускорение свободного падения.

Выражение (3.27) представляет собой дифференциальное уравнение, описывающее действие пружинных весов. Его можно переписать в виде

$$m_0 \frac{d^2s}{dt^2} + b \frac{ds}{dt} + ks = (m + m_w)g. \quad (3.28)$$

Для построения блок-схемы сигналов выражение (3.28) можно с применением комплексной частоты $p = i\omega$ преобразовать к виду

$$m_0 p \frac{ds}{dt} + b \frac{ds}{dt} = F - F_{\text{упр}}; \quad (3.29)$$

$$(m_0 p + b) \frac{ds}{dt} = \Delta F, \quad (3.30)$$

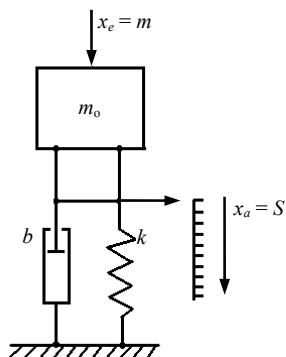


Рис. 3.11. Схематическое изображение измерения массы пружинными весами в динамическом режиме

что позволяет нелинейные преобразования заменить линейными. На рис. 3.12 представлена полная блок-схема сигналов пружинных весов с указанием коэффициентов передачи отдельных звеньев,

где s_0 – удлинение пружины под действием общей массы m_0 . Все нелинейные преобразования, в том числе и преобразование, соответствующее нахождению второй производной от смещения s по времени, или ускорения: $a = d^2s / dt^2 = p^2 s$, заменены линейными.

На основании блок-схемы определим передаточную функцию весов. Блок-схема (рис. 3.12) включает один путь и один контур:

$$P_1: m \rightarrow g \rightarrow \frac{p}{pm_0 + b} \rightarrow \frac{1}{p} \rightarrow \frac{1}{p} \rightarrow s;$$

$$S_1: \frac{p}{pm_0 + b} \rightarrow \frac{1}{p} \rightarrow \frac{1}{p} \rightarrow k.$$

В соответствии с (3.23) передаточная функция

$$G(p) = \frac{g \frac{p}{pm_0 + b} \frac{1}{p} \frac{1}{p}}{1 - (-k) \frac{p}{p^2 (pm_0 + b)}} = \frac{g}{k + p(b + m_0 p)}, \quad (3.31)$$

или

$$G(p) = \frac{g}{k + pb + p^2 m_0}. \quad (3.32)$$

Передаточная функция весов в динамическом режиме измерений зависит от всех величин (k , m_0 и b), влияющих на инерционность средства измерений. При уравнивании и переходе в статическое состояние $p \rightarrow 0$ и $G(p) \rightarrow g/k = K_p$.

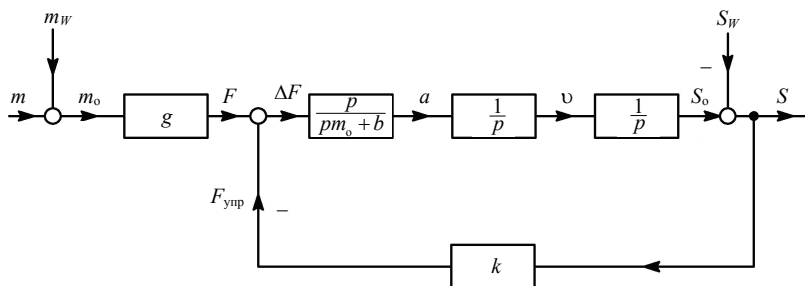


Рис. 3.12. Блок-схема преобразования сигналов при измерении массы пружинными весами в динамическом режиме

Итак, передаточная функция весов

$$G(p) = \frac{x_a}{x_e} = \frac{s}{m} = \frac{g}{k + bp + m_0 p^2}, \quad (3.33)$$

где $x_e = m$ – масса взвешиваемого груза; $x_a = s$ – перемещение стрелочного указателя, а их комплексный коэффициент передачи

$$G(i\omega) = \frac{g}{k + i\omega b - \omega^2 m_0}. \quad (3.34)$$

Сопоставляя выражения (3.33) и (3.34) с общими выражениями для комплексного коэффициента передачи (см. формулу (1.48))

$$G(i\omega) = \frac{K_p}{1 + i\omega \cdot 2T_1 - \omega^2 T_2^2} \quad (3.35)$$

и передаточной функции (формула (1.50))

$$G(p) = \frac{K_p}{1 + 2T_1 p + T_2^2 p^2} \quad (3.36)$$

и учитывая, что собственная частота колебаний груза на пружине $\omega_0 = \sqrt{k/m_0}$, получим следующие соотношения:

$$K_p = \frac{g}{k}; \quad k = m_0 \omega_0^2; \quad \frac{b}{k} = 2T_1; \quad \frac{m_0}{k} = T_2^2; \quad T_2^2 = \frac{1}{\omega_0^2}. \quad (3.37)$$

Коэффициент затухания (демпфирования) колебаний (формула (1.32))

$$\beta = \frac{T_1}{T_2^2} = \frac{b \omega_0^2}{2k}. \quad (3.38)$$

С учетом (3.37) и (3.38) выражение (3.32) для передаточной функции весов преобразуется к виду

$$G(p) = \frac{\frac{g}{k}}{1 + 2p \frac{\beta}{\omega_0^2} + \frac{p^2}{\omega_0^2}}. \quad (3.39)$$

Отсюда получаем выражение для постоянной времени:

$$T_1 = \frac{\beta}{\omega_0^2}. \quad (3.40)$$

Комплексный коэффициент передачи весов

$$G(i\omega) = \frac{\frac{g}{k}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) + i \cdot 2\beta \frac{\omega}{\omega_0^2}} \quad (3.41)$$

объединяет в себе амплитудно-частотную и фазово-частотную динамические характеристики. Модуль комплексного коэффициента передачи, или амплитудно-частотная характеристика весов,

$$|G(i\omega)| = \frac{\frac{g}{k}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\beta^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^4}}}. \quad (3.42)$$

Фазово-частотная характеристика весов определяется соотношением

$$\delta\varphi(\omega) = -\arctg \frac{2\beta \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}. \quad (3.43)$$

С другой стороны, процесс измерения массы пружинными весами в динамическом режиме можно рассматривать с позиций временных

динамических характеристик. При малых значениях коэффициента затухания измерения реализуются с запаздыванием и затухающим колебательным переходным процессом. Средство измерений характеризуется при этом переходной характеристикой с временной задержкой второго порядка (формула (1.25) и рис. 1.7). При больших значениях β процесс установления весов является аperiodическим и весы можно охарактеризовать переходной характеристикой с временной задержкой первого порядка (формула (1.24) и рис. 1.6).

3.1.4. Определение характеристик оптических спектральных приборов

Принцип действия оптических спектральных приборов основан чаще всего на пространственном разделении излучений, различающихся по длинам волн. Такое разделение возможно вследствие дисперсии или дифракции электромагнитных световых волн. Наиболее универсальные рабочие элементы оптических спектральных приборов – дисперсионные призмы и дифракционные решетки. Основными характеристиками способности призм и решеток к пространственному разделению спектральных линий с близкими значениями длин волн являются угловая дисперсия и разрешающая способность.

Угловая дисперсия характеризует угловую ширину спектра и определяется как угол между двумя соседними спектральными линиями, длины волн которых различаются на единицу:

$$D = \frac{\Delta\beta}{\Delta\lambda}. \quad (3.44)$$

Разрешающая способность спектрального прибора определяется отношением длины волны λ анализируемого излучения к наименьшему интервалу $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ длин волн, который еще может разрешить спектральный прибор:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (3.45)$$

Угловая дисперсия спектральной призмы $\Delta\delta / \Delta\lambda$ зависит от материала призмы (показателя преломления n и дисперсии $dn / d\lambda \approx \Delta n / \Delta\lambda$), преломляющего угла γ призмы и угла падения i света на призму (а следовательно, от углов i_1 и i_2 преломления на каждой из граней призмы) (формула (2.25) и рис. 2.21):

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta\lambda} = \frac{\sin \gamma}{\sin i_1 \cos i_2} \frac{\Delta n}{\Delta\lambda}. \quad (3.46)$$

Разрешающая способность спектральной призмы определяется в соответствии с критерием Рэлея исходя из того, что угловое расстояние между максимумами двух соседних спектральных линий больше или равно угловому расстоянию от максимума до ближайшего минимума. Она оказывается равной произведению длины l основания призмы на дисперсию ее показателя преломления (формула (2.28)):

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = l \frac{\Delta n}{\Delta\lambda}. \quad (3.47)$$

Соответствующие характеристики дифракционной решетки рассмотрим более подробно.

Пример 12. Определение спектральных характеристик дифракционной решетки

Пусть имеется прозрачная дифракционная решетка, ширина заштрихованной области которой $W = 2,5$ см. Период решетки $d = 5$ мкм, ширина ее прозрачных щелей $b = 1$ мкм. Определим максимально возможный порядок спектра m_{\max}^* , в котором с применением решетки можно наблюдать спектральную линию с длиной волны $\lambda = 500$ нм, а также угловую дисперсию решетки и максимальное значение ее разрешающей способности для света с данной длиной волны.

При нормальном падении анализируемого излучения на дифракционную решетку ($\alpha = 0$) условие получения главных дифракционных максимумов (формула (2.23), рис. 2.22) имеет вид

$$d \sin \beta = \pm m\lambda. \quad (3.48)$$

Теоретическому значению максимально возможного порядка спектра m , в котором возможно наблюдать спектральную линию с длиной волны λ , соответствует максимальное значение $\sin \beta = 1$ для угла отклонения $\beta = 90^\circ$. Поэтому

$$m_{\max} = \frac{d}{\lambda}. \quad (3.49)$$

Вычисления по формуле (3.49) дают значение $m_{\max} = 10$, которое в точности соответствует углу отклонения $\beta = 90^\circ$. Однако световые лучи, отклоненные дифракционной решеткой на угол $\beta = 90^\circ$, наблюдаться не могут. Поэтому в качестве m_{\max} следует взять значение на единицу меньше ($m_{\max} = 9$). Спектральная линия с заданной длиной волны в спектре девятого порядка должна наблюдаться при угле отклонения $\beta = \arcsin(9\lambda / d)$. Согласно вычислениям, $\beta = 64,16^\circ$. В силу симметрии дифракционной картины, получаемой с применением решетки, должно наблюдаться 18 спектральных линий (по обе стороны от центрального максимума) с длиной волны λ .

Однако не все из этих линий будут иметь достаточную интенсивность. Наиболее интенсивными и, следовательно, доступными для наблюдения будут те из спектральных линий, которые расположены в пределах угловой ширины центрального дифракционного максимума, даваемого каждой из щелей решетки. Условие получения минимумов интенсивности при дифракции света на одной щели шириной b имеет вид

$$b \sin \beta = \pm m \lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (3.50)$$

Половине угловой ширины центрального дифракционного максимума, даваемого каждой из щелей решетки и расположенного между двумя симметричными первыми ($m = 1$) минимумами, соответствует условие

$$\sin \beta = \frac{\lambda}{b}. \quad (3.51)$$

Подставим выражение (3.51) в условие (3.48) получения главных дифракционных максимумов решетки:

$$d \frac{\lambda}{b} = m_{\max}^* \lambda. \quad (3.52)$$

Откуда

$$m_{\max}^* = \frac{d}{b}. \quad (3.53)$$

Вычисление по формуле (3.53) дает значение $m_{\max}^* = 5$. Следовательно, в дифракционном спектре будет наблюдаться пять порядков с интенсивными, доступными для наблюдения и анализа спектральными линиями. Общее количество интенсивных спектров равно десяти. Спектральная линия с длиной волны $\lambda = 500$ нм в спектре пятого порядка будет наблюдаться под углом $\beta = 30^\circ$.

Выведем выражение для угловой дисперсии дифракционной решетки. Дифференцируя выражение (3.48), получим

$$d \cos \beta \cdot d\beta = m d\lambda.$$

Откуда угловая дисперсия

$$D = \frac{\Delta \beta}{\Delta \lambda} = \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta}. \quad (3.54)$$

Выражая $\cos \beta$ из (3.48), получим формулу для определения угловой дисперсии решетки через ее период и длину волны спектральной линии:

$$D = \frac{m}{\sqrt{d^2 - m^2 \lambda^2}}. \quad (3.55)$$

Вычислим значения угловой дисперсии решетки для длины волны $\lambda = 500$ нм в спектрах пятого и первого порядков:

$$D_5 = \frac{5}{\sqrt{5000^2 - 5^2 \cdot 500^2}} = 1,155 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^{-1};$$

$$D_1 = \frac{1}{\sqrt{5000^2 - 1^2 \cdot 500^2}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ нм}^{-1}.$$

Полученный результат означает, что в спектре пятого порядка соседние спектральные линии, длины волн которых различаются на 1 нм, будут отклонены на углы β , значения которых различаются на $\Delta\beta = 1,155 \cdot 10^{-3}$ рад $= 6,62 \cdot 10^{-2}^\circ = 3,97'$. Кроме того, значение D зависит от порядка спектра и периода решетки. В спектре первого порядка значение $\Delta\beta = 2 \cdot 10^{-4}$ рад $= 1,15 \cdot 10^{-2}^\circ = 0,69'$.

Определим максимальное значение соответствующей критерию Рэлея (формула (2.26), рис. 2.24) разрешающей способности решетки:

$$R_{\max} = m_{\max}^* N = m_{\max}^* \frac{W}{d}. \quad (3.56)$$

Вычисленное значение (для $m_{\max}^* = 5$) $R_{\max} = 25\,000$. Поскольку $R = \lambda / \Delta\lambda$, то полученный результат означает, что в спектре пятого порядка дифракционная решетка сможет разрешить соседние спектральные линии вблизи $\lambda = 500$ нм, длины волн которых различаются на $\Delta\lambda_{\min} = 0,02$ нм.

3.1.5. Моделирование распределений интенсивности рентгеновских спектральных линий

Регистрация и спектрометрия характеристического излучения, испускаемого атомами исследуемых веществ, лежат в основе рентгеновского спектрального анализа веществ (см. подразд. 2.4.5). Вследствие расщепления энергетических уровней атомов, обусловленного спин-орбитальным взаимодействием, спектры характеристического рентгеновского излучения имеют дублетную структуру. Наиболее интенсивными являются спектральные линии K_α -серии рентгеновского излучения. Распределение интенсивности спектрального дублета K_α -серии излучения атомов алюминия по энергиям представлено в качестве примера на рис. 2.59. Интенсивность $K_{\alpha 1}$ -линии всегда больше интенсивности $K_{\alpha 2}$ -линии. Профиль распределения интенсивности каждой из линий дублета можно моделировать нормальным распределением Гаусса. Ширина спектральной линии связана с временем жизни соответствующего возбужденного состояния атома, а также определяется разрешающей

способностью спектрального прибора. Спектрометрия с дисперсией по длинам волн основана на дифракции рентгеновского излучения на кристаллическом анализаторе. В прил. 7 приведены приближенные значения энергии квантов K_α -излучения и достаточно точные значения длин волн рентгеновских спектральных $K_{\alpha 1}$ - и $K_{\alpha 2}$ -линий атомов элементов. Построение распределения интенсивности этих линий позволяет сформировать представления о структуре спектров характеристического рентгеновского излучения, а также атомных спектров вообще.

Распределение интенсивности каждой из линий спектрального K_α -дублета характеристического рентгеновского излучения атомов по длинам волн будем моделировать нормальным распределением Гаусса, которое в общем случае выражается функцией

$$y(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (3.57)$$

где μ – значение аргумента x , соответствующее максимуму функции $y(x)$; σ – стандартное отклонение.

В нашем случае нормальное распределение для интенсивности спектральной линии можно представить соотношением

$$I(\lambda) = I_{\max} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_{\max}}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (3.58)$$

где $I(\lambda)$ – интенсивность спектральной линии в зависимости от длины волны λ ; I_{\max} – значение интенсивности спектральной линии в максимуме распределения; λ_{\max} – длина волны, соответствующая максимуму распределения интенсивности спектральной линии; σ – стандартное отклонение, определяющее ширину моделируемой спектральной линии. При заданных значениях I_{\max} , λ_{\max} и σ по формуле (3.58) можно рассчитать распределение интенсивности спектральной линии по длинам волн.

Переходя от выражения (3.57) при $\mu = 0$ и $\sigma = 1$ к стандартному нормальному распределению и используя подстановку

$$\frac{x - \mu}{\sigma} = u, \quad (3.59)$$

получим нормированную функцию гауссового распределения:

$$y(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{u^2}{2} \right). \quad (3.60)$$

Значения нормированной функции (3.60) нормального распределения в зависимости от параметра u приведены в прил. 14.

Пример 13. Построение распределения интенсивности рентгеновских спектральных линий K_{α} -серии алюминия по длинам волн

При построении распределения интенсивности спектральной линии по длинам волн параметр

$$u = \frac{\lambda - \lambda_{\max}}{\sigma}, \quad (3.61)$$

и функция распределения (3.58) будет иметь вид

$$I(\lambda) = I_{\max} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), \quad (3.62)$$

или с учетом формулы (3.60)

$$I(\lambda) = \sqrt{2\pi} I_{\max} y(u), \quad (3.63)$$

где $y(u)$ – значения нормированной функции распределения, взятые из прил. 14.

Значения длин волн K_{α} -излучения атомов элементов приведены в прил. 7. Для атомов алюминия длина волны $K_{\alpha 1}$ -излучения $\lambda_1 = \lambda_{1\max} = 8,33934 \text{ \AA}$, а длина волны $K_{\alpha 2}$ -излучения $\lambda_2 = \lambda_{2\max} = 8,34173 \text{ \AA}$. Этим значениям длин волн соответствуют максимумы интенсивности спектральных линий. Отношение максимальных значений интенсивности спектральных линий $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ примем равным 2 : 1; максимальное значение интенсивности $K_{\alpha 1}$ -линии примем равным единице ($I_{1\max} = 1$ отн. ед.), тогда $I_{2\max} = 0,5$ отн. ед. Разность $\Delta\lambda = \lambda_{2\max} - \lambda_{1\max} = 0,00239 \text{ \AA}$; значение стандартного отклонения примем $\sigma = 0,0015 \text{ \AA}$.

Результаты расчетов, проведенных с применением соотношений (3.61), (3.62) и данных прил. 14, представлены в табл. 3.1. При вычислениях для каждой из спектральных линий по формуле (3.61) определен модуль параметра u в интервале значений длин волн λ , в которых значения $|u| \leq 3$. Значения u определены также для длин волн $\lambda_{1\max}$ и $\lambda_{2\max}$. Затем с использованием данных прил. 14 по формуле (3.63) или непосредственно по формуле (3.62) вычислены относительные значения интенсивности I каждой из $K_{\alpha 1}$ - и $K_{\alpha 2}$ -спектральных линий. При значениях параметра $|u| > 3$ интенсивности можно считать пренебрежимо малыми. В последней колонке табл. 3.1 приведены значения суммарной интенсивности обеих спектральных линий K_{α} -серии в зависимости от длины волны.

Таблица 3.1

**Результаты расчетов распределения интенсивности
спектральных линий K_{α} -излучения атомов алюминия**

$\lambda, \text{\AA}$	$K_{\alpha 1} : \lambda_1 = 8,33934 \text{\AA}$		$K_{\alpha 2} : \lambda_2 = 8,34173 \text{\AA}$		K_{α}
	$ u $	I , отн. ед.	$ u $	I , отн. ед.	
8,3350	2,89	0,015	—	—	0,015
8,3355	2,56	0,038	—	—	0,038
8,3360	2,23	0,083	—	—	0,083
8,3365	1,89	0,168	—	—	0,168
8,3370	1,56	0,296	—	—	0,296
8,3375	1,23	0,469	2,82	0,009	0,478
8,3380	0,89	0,673	2,49	0,023	0,696
8,3385	0,56	0,855	2,15	0,050	0,905
8,3390	0,23	0,974	1,82	0,095	1,069
8,33934	0	1,000	1,59	0,141	1,141
8,3395	0,11	0,994	1,49	0,165	1,159
8,3400	0,44	0,908	1,15	0,258	1,166
8,3405	0,77	0,743	0,82	0,357	1,100
8,3410	1,11	0,540	0,49	0,443	0,983
8,3415	1,44	0,355	0,15	0,494	0,849
8,34173	1,59	0,282	0	0,500	0,782
8,3420	1,77	0,209	0,18	0,492	0,701
8,3425	2,11	0,108	0,51	0,439	0,547
8,3430	2,44	0,051	0,85	0,348	0,399
8,3435	2,77	0,022	1,18	0,249	0,271
8,3440	—	—	1,51	0,160	0,160
8,3445	—	—	1,85	0,090	0,090
8,3450	—	—	2,18	0,046	0,046
8,3455	—	—	2,51	0,021	0,021
8,3460	—	—	2,85	0,009	0,009

По расчетным данным построены графические зависимости интенсивности спектральных линий от длины волны рентгеновского излучения. В результате получено распределение интенсивности спектральных линий дублета K_{α} -серии излучения атомов алюминия по длинам волн (рис. 3.13). Такое же распределение, только по энергии, приведено на рис. 2.59. В силу небольшой разности

$$\Delta\lambda = \lambda_{2\max} - \lambda_{1\max}$$

суммарное K_{α} -излучение алюминия можно считать практически монохроматичным. Это позволяет использовать K_{α} -излучение алюминия, а также магния в качестве возбуждающего эмиссию фотоэлектронов в рентгеновских фотоэлектронных спектрометрах.

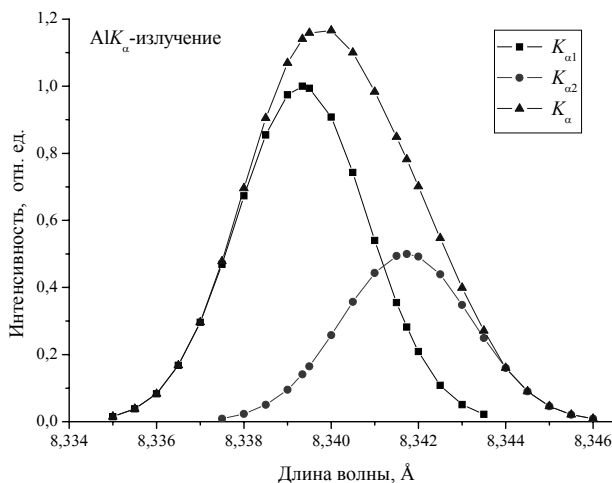


Рис. 3.13. Распределение интенсивности спектральных линий дублета K_{α} -серии излучения атомов алюминия по длинам волн

Пример 14. Построение распределения интенсивности рентгеновских спектральных линий K_{α} -серии платины по длинам волн

Для платины (см. прил. 7) длины волн $K_{\alpha 1}$ - и $K_{\alpha 2}$ -излучения, которым соответствуют максимумы интенсивности спектральных линий, — $\lambda_1 = \lambda_{1\max} = 0,185511 \text{ Å}$ и $\lambda_2 = \lambda_{2\max} = 0,190381 \text{ Å}$. Разность $\lambda_{2\max} - \lambda_{1\max} = 0,00487 \text{ Å}$. Отношение максимальных значений интенсивностей спектральных линий $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ также примем равным 2 : 1; максимальное значение интенсивности $K_{\alpha 1}$ -линии примем равным единице ($I_{1\max} = 1$ отн. ед.), тогда $I_{2\max} = 0,5$ отн. ед.; значение стандартного отклонения $\sigma = 0,0015 \text{ Å}$.

Результаты расчетов, проведенных с применением соотношений (3.61), (3.62) или (3.63), представлены в табл. 3.2, а график распределения интенсивности спектральных линий — на рис. 3.14.

Таблица 3.2

Результаты расчетов распределения интенсивности спектральных линий K_{α} -излучения атомов платины

$\lambda, \text{ Å}$	$K_{\alpha 1} : \lambda_1 = 0,185511 \text{ Å}$		$K_{\alpha 2} : \lambda_2 = 0,190381 \text{ Å}$		K_{α} $I, \text{ отн. ед.}$
	$ u $	$I, \text{ отн. ед.}$	$ u $	$I, \text{ отн. ед.}$	
0,1810	3,01	0,011	—	—	0,011
0,1815	2,67	0,028	—	—	0,028
0,1820	2,34	0,065	—	—	0,065
0,1825	2,01	0,133	—	—	0,133
0,1830	1,67	0,245	—	—	0,245
0,1835	1,34	0,407	—	—	0,407

$\lambda, \text{\AA}$	$K_{\alpha 1} : \lambda_1 = 0,185511 \text{\AA}$		$K_{\alpha 2} : \lambda_2 = 0,190381 \text{\AA}$		K_{α}
	$ \mu $	$I, \text{отн. ед.}$	$ \mu $	$I, \text{отн. ед.}$	$I, \text{отн. ед.}$
0,1840	1,01	0,600	—	—	0,600
0,1845	0,67	0,799	—	—	0,799
0,1850	0,34	0,944	—	—	0,944
0,185511	0	1,000	—	—	1,000
0,1860	0,33	0,947	2,92	0,007	0,954
0,1865	0,66	0,804	2,59	0,017	0,821
0,1870	0,99	0,613	2,25	0,040	0,653
0,1875	1,33	0,413	1,92	0,079	0,492
0,1880	1,66	0,252	1,59	0,141	0,393
0,1885	1,99	0,138	1,25	0,229	0,367
0,1890	2,33	0,066	0,92	0,327	0,393
0,1895	2,66	0,029	0,59	0,420	0,449
0,1900	2,99	0,011	0,25	0,485	0,496
0,190381	—	—	0	0,500	0,500
0,1905	—	—	0,08	0,498	0,498
0,1910	—	—	0,41	0,460	0,460
0,1915	—	—	0,75	0,377	0,377
0,1920	—	—	1,08	0,279	0,279
0,1925	—	—	1,41	0,185	0,185
0,1930	—	—	1,75	0,108	0,108
0,1935	—	—	2,08	0,057	0,057
0,1940	—	—	2,41	0,027	0,027
0,1945	—	—	2,75	0,011	0,011

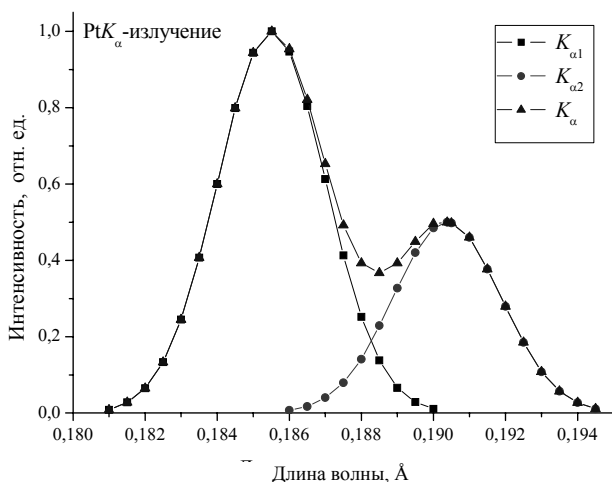


Рис. 3.14. Распределение интенсивности спектральных линий дублета K_{α} -серии излучения атомов платины по длинам волн

Распределение интенсивности, приведенное на рис. 3.14, показывает, что спектральный дублет K_{α} -излучения платины практически полностью разрешается в соответствии с критерием Рэлея (см. рис. 2.24).

3.1.6. Определение состава веществ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии

Фотоэлектронный спектр представляет собой распределение по кинетическим энергиям фотоэлектронов, эмиттируемых из основных энергетических уровней атомов исследуемого вещества под действием рентгеновского излучения. Для удобства анализа в фотоэлектронных спектрах по оси энергий вместо кинетической энергии E_k фотоэлектронов откладываются значения энергий связи электронов $E_B(k)$ в атомах (см. формулу (2.128)). Элементный анализ проводится путем сравнения экспериментально полученных фотоэлектронных спектральных линий исследуемого образца с известными значениями энергий связи электронов в атомах элементов, представленными в соответствующих таблицах (прил. 8).

Пример 15. Определение элементного состава образца по обзорному фотоэлектронному спектру

На рис. 3.15 представлен спектр фотоэлектронов, возбужденных рентгеновским MgK_{α} -излучением с поверхности слоя, сформированного на стеклогуглероде осаждением иридия и свинца с одновременным перемешиванием формируемого слоя ионами осаждаемого металла.

Спектр снят в интервале кинетических энергий фотоэлектронов ~ 1000 эВ (соответствующие значения энергии связи лежат в интервале от 10 до 1000 эВ), т. е. является обзорным.

При идентификации элементов по фотоэлектронным спектрам следует иметь в виду, что обычно исследуются наиболее интенсивные спектральные линии элементов, которым соответствуют высокие значения сечений фотоионизации. Кроме того, экспериментальные значения энергий связи могут вследствие энергетических сдвигов отличаться от табличных в пределах нескольких электронвольт. При наличии различных валентных состояний элемента в анализируемом слое обнаруживается несколько линий, соответствующих данному энергетическому уровню элемента.

Наряду с атомами элементов, входящих в состав вещества образца, на поверхности с неизбежностью присутствуют адсорбированные примеси, например кислород, пары воды, углеводородные загрязнения и т. д. Поэтому в фотоэлектронных спектрах практически всегда имеются линии кислорода и углерода, которые, как и в случае других легких элементов, соответствуют возбуждению фотоэлектронов с основного $1s$ -уровня. Так, табличные значения энергий связи электронов, находящихся в $1s$ -состоянии атомов углерода и кислорода, равны 284 и 532 эВ соответственно (прил. 8), по которым и идентифицируются спектральные линии этих элементов.

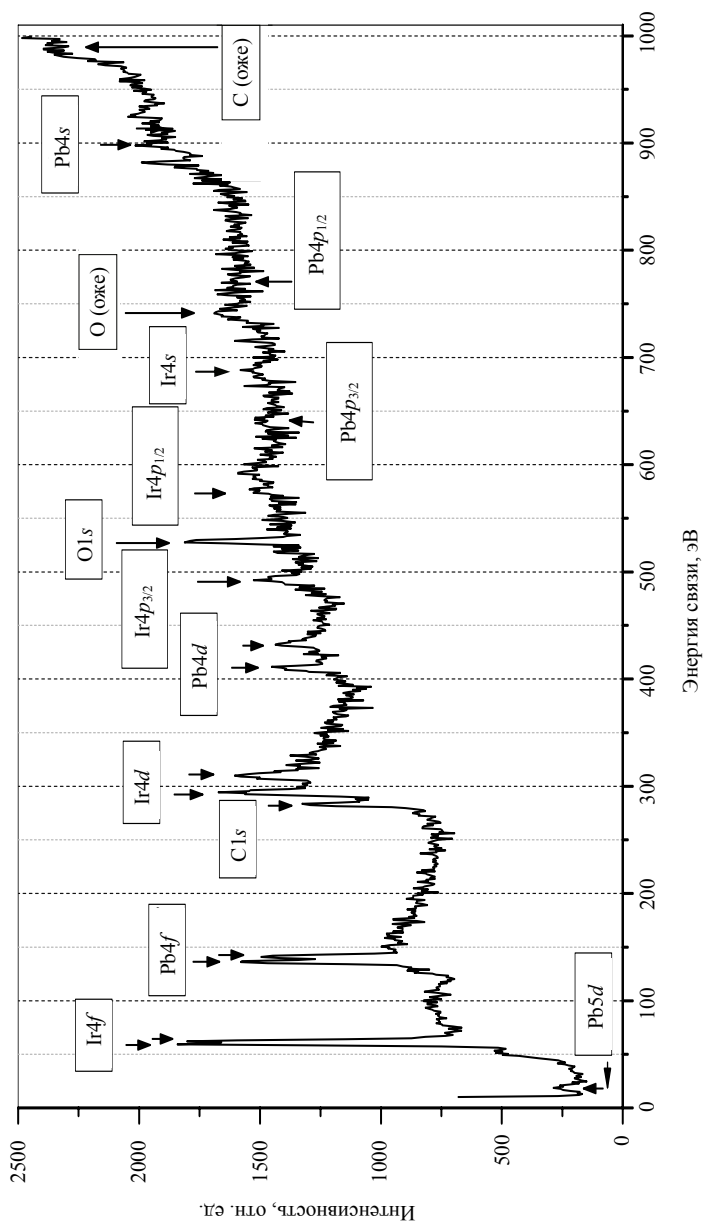


Рис. 3.15. Спектр фотоэлектронов, возбужденных рентгеновским MgK_{α} -излучением с поверхности слоя, сформированного на стеклоуглероде осаждением иридия и свинца

Для идентификации элементов, атомы которых имеют более сложное электронное строение, анализируется несколько энергетических уровней атомов каждого из элементов. При этом вначале в спектре берется наиболее интенсивная спектральная линия, входящая, как правило, в спектральный дублет, наличие которого обусловлено расщеплением энергетических уровней атомов на подуровни вследствие спин-орбитального взаимодействия.

Измеренное (экспериментальное) значение энергии связи, соответствующее данной линии, сравнивается с табличными значениями, которые выделены в прил. 8 полужирным шрифтом. Результаты обработки спектра, приведенного на рис. 3.15, даны в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты обработки фотоэлектронного спектра

Энергия связи, эВ		Атом элемента	Энергетический уровень	Сечение фотоионизации, отн. ед.	Интенсивность линии, отн. ед.
эксп.	табл.				
19	20; 22	Pb	$5d_{5/2, 3/2}$	1,29; 0,90	—
59	60	Ir	$4f_{7/2}$	8,03	1350
62	63	Ir	$4f_{5/2}$	6,30	—
136	138	Pb	$4f_{7/2}$	12,80	810
141	143	Pb	$4f_{5/2}$	10,00	—
284	284	C	$1s_{1/2}$	1,00	470
294	295	Ir	$4d_{5/2}$	8,90	—
310	312	Ir	$4d_{3/2}$	6,05	—
411	413	Pb	$4d_{5/2}$	10,40	—
432	435	Pb	$4d_{3/2}$	6,94	—
492	495	Ir	$4p_{3/2}$	4,34	—
528	532	O	$1s_{1/2}$	2,85	495
577	577	Ir	$4p_{1/2}$	1,55	—
639	645	Pb	$4p_{3/2}$	4,86	—
688	690	Ir	$4s_{1/2}$	1,43	—
741	743	O	Оже-линия	—	—
770	764	Pb	$4p_{1/2}$	1,47	—
898	894	Pb	$4s_{1/2}$	1,46	—
988	993	C	Оже-линия	—	—

В нашем примере можно выбрать линию, которой соответствует измеренное значение энергии связи, равное 59 эВ. Подходящей является линия с табличным значением энергии связи 60 эВ, обусловленная эмиссией фотоэлектронов с $4f_{7/2}$ -уровней атомов иридия.

Анализируя табличные данные прил. 8, находим спектральные линии, соответствующие эмиссии электронов из других энергетических

уровней атомов иридия, и вносим табличные значения энергии связи, а также обозначения энергетических уровней в табл. 3.3. При этом идентифицируется семь спектральных линий атомов иридия.

После этого часть спектральных линий остается все еще не идентифицированной. Из оставшихся линий выбираем наиболее интенсивную и принадлежащую спектральному дублету. Такой является линия с измеренным значением энергии связи, равным 136 эВ. Этой линии соответствуют эмиссия фотоэлектронов из $4f_{7/2}$ -уровней атомов свинца. Анализ табличных данных прил. 8 позволяет идентифицировать набор из восьми спектральных линий, обусловленных эмиссией электронов из атомов свинца.

Еще две из оставшихся спектральных линий идентифицируются как оже-линии атомов углерода и кислорода.

Затем из прил. 9 выпишем значения сечений фотоионизации атомов элементов, входящих в состав анализируемого слоя исследуемого образца. Сечение фотоионизации имеет тот же смысл, что и эффективное сечение взаимодействия (см. подразд. 2.4.5), и в данном случае характеризует вероятность процесса эмиссии электрона из определенного энергетического состояния атома под воздействием рентгеновского фотона. Значение сечения фотоионизации зависит от природы атома и конкретного энергетического уровня. Наиболее интенсивным спектральным линиям одного и того же элемента соответствуют большие значения сечений фотоионизации. В прил. 9 значения сечений фотоионизации σ энергетических уровней атомов элементов приведены по отношению к сечению фотоионизации $1s$ -уровня атомов углерода (значение σ для $1s$ -уровня принято равным единице), и по этой причине они безразмерны или выражены в относительных единицах.

Определим также интенсивности наиболее характерных спектральных линий каждого из элементов. Корректное измерение интенсивности линии осуществляется путем вычисления площади под спектральным пиком за вычетом фона, что затруднительно сделать по обзорному фотоэлектронному спектру. Поэтому для оценочного расчета относительного содержания атомов можно интенсивность спектральных линий определять как их высоту над уровнем фона. Определенные таким образом значения интенсивности приведены в табл. 3.3.

По отношению интенсивностей спектральных линий оценим относительное содержание атомов элементов в анализируемом слое. При этом можно применить приближенное соотношение (2.132). Оценку относительного содержания атомов иридия, свинца и кислорода проведем по отношению к углероду. Тогда относительное содержание каждого из элементов будет равным

$$\frac{N_i}{N_C} \approx \frac{\sigma_C}{\sigma_i} \frac{I_i}{I_C}, \quad (3.64)$$

где σ – значения сечений фотоионизации атомов i -го элемента и углерода из определенных энергетических состояний; I – интенсивности соответствующих спектральных линий.

Результаты вычислений с использованием соответствующих значений интенсивностей и сечений фотоионизации (табл. 3.3) приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Результаты оценочных расчетов относительного содержания атомов элементов в анализируемом слое покрытия

Элемент	Относительное содержание
Ig	0,36
Pb	0,14
O	0,37
C	1,00

Значительное относительное содержание атомов углерода и кислорода может быть объяснено тем, что толщина анализируемого методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии слоя составляет всего несколько нанометров, т. е. анализу подвергается тонкий приповерхностный слой вещества, включающий небольшое число молекулярных слоев. Атомы углерода и кислорода входят в состав адсорбированных на поверхности газов, а также в состав покрытия.

Пример 16. Анализ изменения состава поверхностного слоя образца по глубине

Толщина анализируемого методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии слоя определяется в основном глубиной выхода фотоэлектронов и составляет всего несколько нанометров. Однако во многих случаях требуется определить состав более глубоких слоев вещества и распределение атомов элементов по глубине. Анализ более глубоких слоев осуществляется при послойном распылении поверхности образца пучком ионов инертного газа (например, аргона).

На рис. 3.16 представлены обзорные спектры фотоэлектронной эмиссии из слоя, сформированного на поверхности стеклоуглерода осаждением палладия и вольфрама с одновременным перемешиванием формируемого слоя ионами осаждаемого металла, полученные до и после травления поверхности ускоренными ионами аргона. Спектр 1 отображает состав самого приповерхностного слоя, спектр 2 – слоя, расположенного на несколько большей глубине.

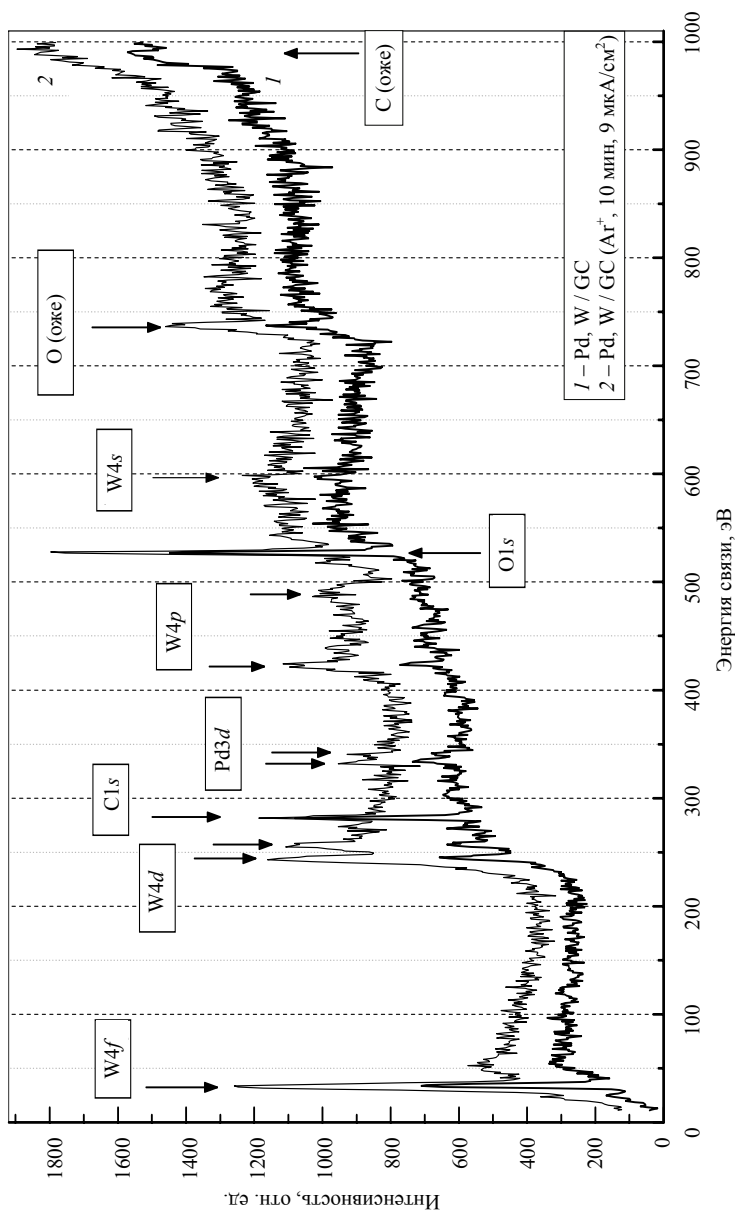


Рис. 3.16. Спектры фотоэлектронной эмиссии из слоя, сформированного на стеклогуглероде осаждением палладия и вольфрама, полученные до (1) и после (2) травления поверхности ускоренными ионами Ag^+

Проведем обработку спектров по методике, изложенной в при-
мере 15, с использованием табличных данных (прил. 8 и 9). Результаты
обработки представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Результаты обработки фотоэлектронных спектров

Энергия связи, эВ		Атом элемента	Энергетический уровень	Сечение фотоионизации, отн. ед.	Интенсивность линии, отн. ед.	
эксп.	табл.				Спектр 1	Спектр 2
33	34	W	$4f_{7/2}$	5,75	—	—
36	37	W	$4f_{5/2}$	4,92	—	—
243	246	W	$4d_{5/2}$	8,01	265	490
255	259	W	$4d_{3/2}$	5,48	—	—
282	284	C	$1s_{1/2}$	1,00	545	340
332	335	Pd	$3d_{5/2}$	9,54	145	165
341	340	Pd	$3d_{3/2}$	6,58	—	—
422	426	W	$4p_{3/2}$	4,03	—	—
486	492	W	$4p_{1/2}$	1,55	—	—
528	532	O	$1s_{1/2}$	2,85	720	800
595	595	W	$4s_{1/2}$	1,39	—	—
741	743	O	Ожé	—	—	—
988	993	C	Ожé	—	—	—

Для анализа изменения состава с глубиной сравним интенсивности спектральных линий каждого из элементов в обоих спектрах, принимая во внимание, что оба спектра сняты в одинаковых условиях. Распыление поверхностного слоя ионами аргона проводилось в аналитической камере электронного спектрометра в условиях сверхвысокого вакуума. Наблюдается существенное уменьшение содержания углерода и увеличение содержания вольфрама. Содержание палладия и кислорода также несколько возрастает.

Результаты оценочных расчетов относительного содержания элементов в каждом из проанализированных слоев по отношению к углероду, проведенных по формуле (3.64), приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Результаты оценочных расчетов относительного содержания атомов элементов в анализируемых слоях

Элемент	Относительное содержание	
	Спектр 1	Спектр 2
W	0,06	0,18
Pd	0,03	0,05
O	0,46	0,82
C	1,00	1,00

Пример 17. Анализ особенностей электронной структуры атомов в составе анализируемого слоя

При исследовании особенностей электронной структуры (или валентных состояний) атомов элементов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии спектр, в отличие от обзорного, снимается по участкам в пределах 10–20 эВ вблизи наиболее характерных спектральных линий атомов, входящих в состав анализируемого слоя.

Рассмотрим методику анализа валентных состояний атомов элемента в составе вещества на примере. На рис. 3.17 приведены спектры фотоэлектронов, возбужденных с $4f$ -состояний атомов платины, входящих в состав слоя, сформированного осаждением металла на стеклоуглерод (GC) с одновременным перемешиванием формируемого слоя ускоренными ионами осаждаемого металла. Приведены спектры, снятые с самой поверхности (рис. 3.17, *а*) и после травления анализируемой поверхности ускоренными ионами Ag^+ в течение 5 мин при плотности ионного тока 10 мкА/см² (рис. 3.17, *б*). Спектры сняты на участке в пределах энергий связи ~67–80 эВ с интервалом значений кинетических энергий фотоэлектронов, составляющим 0,2 эВ. Этому участку соответствует эмиссия электронов с $4f_{7/2}$ - и $4f_{5/2}$ -подуровней атомов платины; табличные значения энергии связи равны соответственно 70 и 74 эВ (см. прил. 8).

Экспериментальные спектры математически обработаны путем однократного сглаживания по пяти соседним точкам, вычитания фона и разложения на составляющие спектральные пики по модели Гаусса.

При разложении спектров обнаруживается, что атомы платины в анализируемом слое находятся в трех различных валентных состояниях. Кроме того, электронная структура атомов Pt изменяется по мере ионного травления поверхности, т. е. с глубиной анализируемого слоя. С использованием справочных данных (NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy Database. Version 3.5 [Электронный ресурс] / National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg, 2003). – Режим доступа: <http://stdata.nist.gov/xps/>) для линии $Pt4f_{7/2}$ эти состояния в каталитическом слое (на некоторой его глубине, после травления ионами Ag^+) (рис. 3.17, *б*) можно идентифицировать как металлическое состояние платины (экспериментальное значение энергии связи $E_B = 70,6$ эВ), платина с хемосорбированным кислородом ($E_B = 71,5$ эВ), платина в составе оксида PtO ($E_B = 72,6$ эВ). На поверхности исследуемого слоя до травления (рис. 3.17, *а*) атомы платины находятся также в трех валентных состояниях, однако наименьшей степенью окисления характеризуются атомы с адсорбированным кислородом ($E_B = 71,2$ эВ); металлическая платина не обнаруживается.

Имеются также атомы платины в составе оксида PtO ($E_B = 72,3$ эВ) и в состоянии более высокой степени окисления ($E_B = 75,8$ эВ).

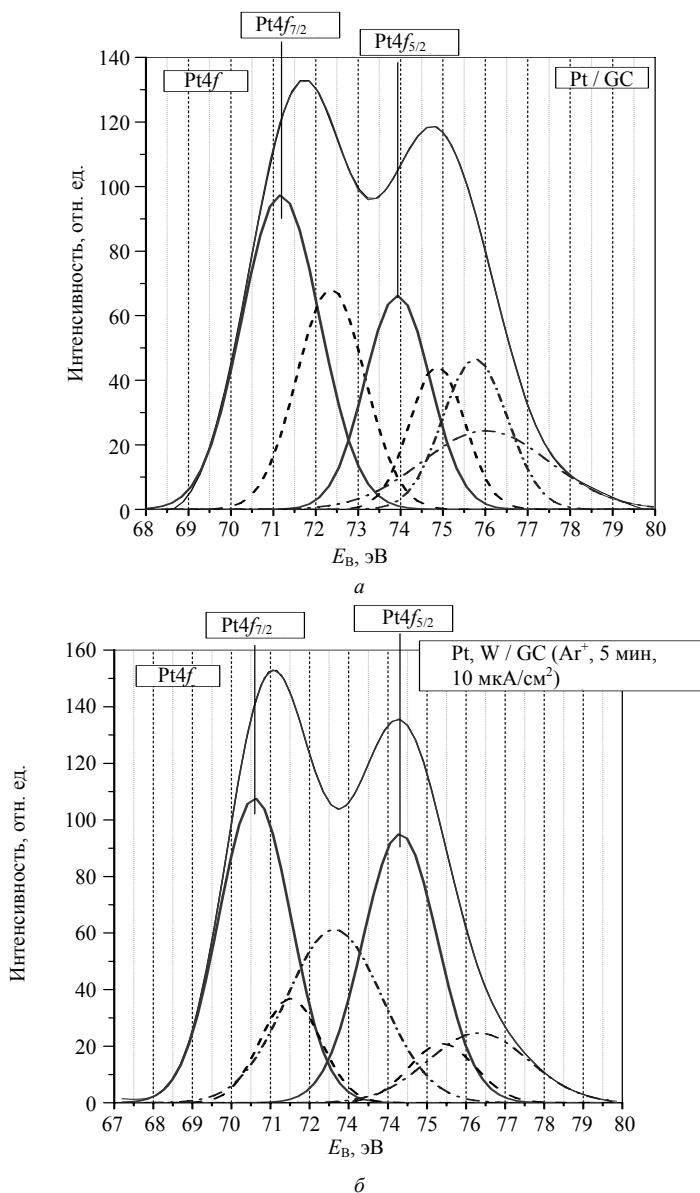


Рис. 3.17. Спектры фотоэлектронов, возбужденных из 4f-состояний атомов платины, входящих в состав анализируемого слоя, снятые до (а) и после (б) травления анализируемой поверхности ускоренными ионами Ar⁺

При более детальном анализе химического состава исследуемого вещества необходимо проанализировать валентные состояния атомов всех элементов, входящих в его состав, и сопоставить полученные данные.

Содержание атомов элемента в каждом из валентных состояний может быть оценено по интенсивностям соответствующих компонентов разложения. При этом интенсивность определяется по площади под спектральным пиком с учетом вычета фона.

3.1.7. Определение состава веществ методом спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния

Спектр резерфордовского обратного рассеяния представляет собой распределение по кинетическим энергиям анализирующих ионов (атомных ядер) ${}^4\text{He}$, претерпевших рассеяние на ядрах атомов элементов, входящих в состав исследуемого вещества. В результате рассеяния изменяется направление движения иона ${}^4\text{He}$ и часть его энергии передается ядру, на котором происходит рассеяние; имеют место потери энергии ионов ${}^4\text{He}$ при ядерном взаимодействии. Угол рассеяния θ зависит от значения прицельного параметра b (рис. 2.67). Регистрируется энергетический спектр ионов ${}^4\text{He}$, попадающих в поверхностно-барьерный кремниевый детектор-энергоанализатор, установленный под углом θ к направлению первичного ионного пучка. Энергия рассеянных ионов зависит от угла рассеяния θ , а также от массы M_2 ядра, с которым произошло взаимодействие. Эта зависимость учитывается кинематическим фактором рассеяния (см. формулу (2.139)) и обеспечивает возможность анализа элементного состава исследуемого вещества. Если же рассеяние происходит на ядрах атомов, расположенных на некоторой глубине, то имеют место дополнительные потери энергии ионов ${}^4\text{He}$ при их взаимодействии с электронами атомов при движении в глубь образца до взаимодействия с ядром и при движении к поверхности после резерфордовского рассеяния на ядре. Эти потери учитываются фактором тормозного сечения $[\epsilon]_j^i$ (см. формулу (2.150)); их наличие обеспечивает возможность анализа распределения атомов каждого из элементов, входящих в состав исследуемого вещества, по глубине образца.

Пример 18. Определение элементного состава стекла

Спектр резерфордовского обратного рассеяния ионов ${}^4\text{He}$, снятый для стекла, состав которого нужно определить, приведен в числовой форме в табл. 3.7. В первом столбце таблицы указаны номера каналов спектрометра (через 10 каналов), а в остальных столбцах – выход обратного рассеяния, соответствующий каждому из каналов, в электрических импульсах, формируемых поверхностно-барьерным кремниевым

детектором (см. рис. 2.47). Начальная энергия анализирующих ионов ^4He составляла 2,0 МэВ; угол рассеяния $\theta = 170^\circ$; углы, отсчитанные от нормали к поверхности исследуемого образца (см. рис. 2.70), $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 10^\circ$.

Таблица 3.7

Распечатка спектра обратного рассеяния

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
50	46621	45577	45116	44946	43479	43531	42895	42836	41348	41234
60	40827	40887	39906	39651	39430	39157	38365	38128	37717	37898
70	36827	36799	36257	36475	35791	35618	34903	35301	34288	34385
80	34150	33897	33474	33294	32884	32706	32229	32413	32363	32040
90	31676	31127	31325	31330	30963	30538	30182	30268	29884	29769
100	29578	29352	28866	29117	28821	29063	28568	28370	28359	28189
110	27845	27972	27411	27480	27273	27155	26921	27018	26949	26982
120	26978	26930	26889	26940	26664	26485	26297	25854	25557	25601
130	25288	25112	25501	25035	25032	24857	24669	24945	24486	24573
140	24547	24537	23903	24275	24028	24030	23738	23750	23840	23611
150	23421	23576	23426	23542	23323	23191	23103	23041	22756	22845
160	23097	22741	22665	22622	22503	22881	22359	22549	22337	22190
170	22258	22067	22127	21661	21584	20797	19581	19036	18252	18060
180	17791	17436	17030	17338	17532	17289	17169	16807	17057	17117
190	17115	16902	17016	17189	16811	16765	16924	17051	16546	16865
200	16492	16655	16506	16616	16343	16531	16476	16311	16328	16391
210	16036	16106	16340	16463	16061	16038	16071	16084	15818	15950
220	16071	16118	16002	15911	15875	15896	15876	16008	15746	15454
230	15666	15510	15570	15553	15332	15377	15435	15253	15097	15100
240	15472	15201	15266	15195	14724	14442	14195	14344	14180	14000
250	14152	14280	14162	14142	14029	14118	14319	14281	14053	14072
260	13967	14152	13980	13906	13799	13986	13735	13966	13820	13953
270	13715	13701	13666	13131	12720	12173	11131	10071	9479	9118
280	8898	8840	8587	8626	8614	8580	8331	8370	8315	8343
290	8334	8260	8205	8400	7997	8207	8308	8353	8067	8357
300	8136	8195	8156	7999	8057	8143	7987	8130	8080	7876
310	8124	8006	8083	8070	8074	7965	8044	8019	7911	7761
320	7824	7868	7864	7784	7693	7618	7161	6878	6627	6191
330	6117	6080	5980	5909	5835	5890	5984	5832	5812	5813
340	5835	5809	5916	5679	5920	5755	5791	5690	6013	5659
350	5853	5717	5876	5597	5758	5820	5713	5684	5652	5635
360	5651	5694	5484	5724	5390	5726	5587	5538	5614	5533
370	5644	5612	5484	5545	5439	5416	5447	5451	5387	5457
380	5432	5429	5236	5579	5474	5446	5359	5411	5405	5365
390	5483	5364	5462	5422	5338	5306	5369	5253	5347	5152
400	5426	5357	5307	5388	5302	5319	5286	5352	5239	5410
410	5416	5295	5157	5117	5246	5223	5021	5063	5124	5260
420	5226	5240	5138	5221	5132	5175	5124	5067	5163	4919
430	4985	4918	5031	4837	4526	4256	3572	2681	1563	759
440	364	145	68	61	35	40	34	44	42	41
450	34	42	44	51	48	41	27	30	20	17
460	15	16	14	21	15	17	11	9	12	17

Построим по данным табл. 3.7 спектр обратного рассеяния, откладывая по оси абсцисс номер канала многоканального анализатора, а по оси ординат – выход рассеяния (рис. 3.18).

Каждому из каналов анализатора-спектрометра соответствует определенный интервал значений кинетической энергии регистрируемых ионов ^4He (энергетическая ширина канала). Для определения энергетической ширины канала и последующей калибровки шкалы спектрометра при снятии спектра определяются данные для калибровки (табл. 3.8). В табл. 3.8 приведены номера каналов анализатора, соответствующие энергиям ионов ^4He , претерпевших резерфордское рассеяние под углом θ на ядрах атомов указанных элементов, расположенных на поверхности исследуемого образца.

Таблица 3.8

Данные для калибровки шкалы спектрометра

Элемент	C	O	Si	Pb
Канал анализатора	127	177	276	450

Используя попарно данные табл. 3.8, рассчитаем по формуле (2.154) четыре значения энергетической ширины канала δE . Вначале определим значения энергий ионов ^4He , имеющих начальную энергию $E_0 = 2,0 \text{ МэВ} = 2000 \text{ кэВ}$, после их рассеяния на ядрах атомов элементов, приведенных в табл. 3.8 (формула (2.153)). Значения кинематического фактора рассеяния K возьмем из прил. 10.

Значения K и результаты вычислений внесем в табл. 3.9. При дальнейшей обработке спектра будем использовать полученное среднее значение $\delta E = 4,162 \text{ кэВ/канал}$.

Таблица 3.9

Результаты расчета энергетической ширины канала спектрометра

Элемент	K	E , кэВ	δE , кэВ/канал		
			Пара	Значение	Среднее
C	0,2526	505,2	Pb – C	4,171	4,162
O	0,3625	725,0	Pb – O	4,130	
Si	0,5657	1131,4	Pb – Si	4,144	
Pb	0,9262	1852,4	Si – C	4,203	

На спектре (рис. 3.18) определим номера каналов, соответствующих средней части каждой из «ступенек», и отметим их вертикальными стрелками. Вертикальные участки «ступенек» размыты вследствие ограничений по разрешающей способности спектрометра, а отмеченные каналы соответствуют энергии ионов ^4He , претерпевших рассеяние на ядрах атомов элементов, расположенных на поверхности образца.

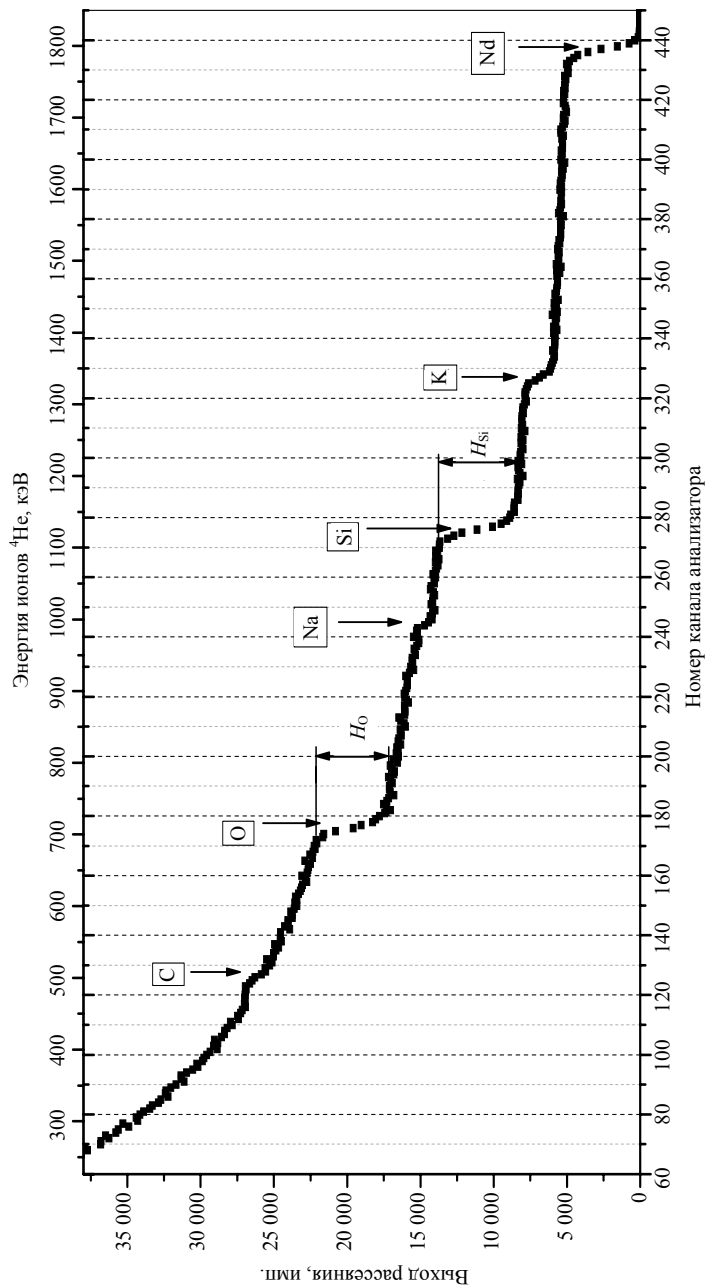


Рис. 3.18. Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He от поверхности исследуемого стекла

При определении элементного состава исследуемого вещества необходимо идентифицировать каждый из таких сигналов. Как следует из данных табл. 3.8, отмеченные каналы с номерами 127, 177 и 276 соответствуют рассеянию анализирующих ионов на ядрах углерода, кислорода и кремния. Обозначим эти элементы на спектре. Остается идентифицировать сигналы, соответствующие другим, неизвестным элементам.

Для этого произведем калибровку энергетической шкалы спектрометра и переход к шкале энергий. В качестве привязки возьмем сигнал, соответствующий рассеянию на ядрах атомов углерода. Ближайшее к $E_C = 505,2$ кэВ округленное значение энергии ионов ^4He равно 500 кэВ. Разность этих значений составляет 5,2 кэВ, что соответствует $\Delta n = 5,2 / 4,162 \approx 1,25$ канала. Следовательно, значению энергии ионов $E = 500$ кэВ соответствует примерно 126-й канал. Интервалу энергий в 100 кэВ соответствует количество каналов, равное $100 / 4,162 \approx 24$. Используя это значение и привязку к сигналу углерода, построим шкалу энергий (верхняя шкала на рис. 3.18).

Неизвестным элементам соответствуют сигналы, приходящиеся на каналы номер 244, 326 и 436. Рассчитаем энергии, соответствующие этим каналам, а также значения кинематического фактора рассеяния. Расчетные значения K -фактора сравним с табличными (прил. 10) и определим элементы, входящие в состав исследуемого стекла. Результаты анализа представлены в табл. 3.10, куда внесены и данные, содержащиеся в табл. 3.8 и 3.9.

Таблица 3.10

Результаты определения элементного состава исследуемого вещества

Номер канала	Энергия ионов, кэВ	Значения K -фактора		Элемент	Высота сигнала, имп.
		расчетное	табличное		
127	505,2	—	0,2526	C	—
177	725,0	—	0,3625	O	4790
244	992,2	0,4961	0,4974	Na	1280
276	1131,4	—	0,5657	Si	5335
326	1333,4	0,6667	0,6651	K	1950
436	1791,3	0,8956	0,8957	Nd	5160

Итак, в состав исследуемого стекла входят кремний, натрий, калий, кислород, неодим, а также углерод. Форма пика углерода на спектре (рис. 3.18) свидетельствует о том, что атомы этого элемента содержатся только в тонком приповерхностном слое стекла.

Оценим относительное содержание атомов элементов, входящих в состав стекла, по отношению к кремнию. Для этого воспользуемся формулой (2.160). Отношение концентрации атомов j -го элемента к концентрации атомов кремния

$$\frac{N_j}{N_{Si}} = \left[\frac{\sigma_{Si} [\varepsilon]_j^{Si}}{\sigma_j [\varepsilon]_{Si}^{Si}} \right] \frac{H_j}{H_{Si}}, \quad (3.65)$$

где σ – дифференциальные сечения рассеяния ионов ^4He на ядрах соответствующих элементов (сечения взаимодействия (см. с. 191)); $[\varepsilon]_j$ – факторы тормозного сечения ионов ^4He в основном материале, в качестве которого условно примем кремний; H – значения высоты сигнала от соответствующего элемента.

Значения высот H_j , определенные по спектру (рис. 3.18), также внесены в табл. 3.10; значения сечений рассеяния содержатся в прил. 12.

Рассчитаем величину, учитывающую потери энергии ионов ^4He при их взаимодействии с электронами атомов при движении в глубь образца до взаимодействия с ядром и при движении к поверхности после резерфордского рассеяния на ядре, называемую фактором тормозного сечения. Выражение для определения фактора тормозного сечения (формула (2.150)) имеет вид

$$[\varepsilon]_j^i = \left[\frac{K_j}{\cos \theta_1} \varepsilon_i(E_0) + \frac{1}{\cos \theta_2} \varepsilon_i(K_j E_0) \right], \quad (3.66)$$

где индекс i относится к тормозящей среде – основному материалу, а индекс j – к рассеивающему центру – ядру атома примеси; ε_i – сечение торможения ионов ^4He на атомах основного материала.

Рассчитаем значения фактора тормозного сечения для всех элементов, входящих в состав стекла, полагая основным элементом кремний. Значения сечений торможений в кремнии будем брать из таблицы прил. 11. Зависимость сечения торможения ионов ^4He от их энергии на атомах ряда элементов представлена также графически в прил. 15.

Для кремния

$$[\varepsilon]_{Si}^{Si} = \left[\frac{0,5657}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 63,80 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 92,65 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}.$$

Значение сечения торможения $\varepsilon_{Si} = 63,80 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}$ при энергии ионов ^4He , равной 1131,4 кэВ и соответствующей рассеянию на ядрах Si, найдено путем интерполяции табличных данных прил. 11 или по соответствующему графику прил. 15.

Проведем аналогичные расчеты значений $[\varepsilon]_j^i$ для других элементов:

$$[\varepsilon]_O^{Si} = \left[\frac{0,3625}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 70,64 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 89,59 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)};$$

$$[\varepsilon]_{\text{Na}}^{\text{Si}} = \left[\frac{0,4974}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 66,38 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 91,91 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)};$$

$$[\varepsilon]_{\text{K}}^{\text{Si}} = \left[\frac{0,6651}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 59,97 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 93,66 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)};$$

$$[\varepsilon]_{\text{Nd}}^{\text{Si}} = \left[\frac{0,8957}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 52,05 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 96,98 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}.$$

По формуле (3.65) рассчитаем относительное содержание атомов элементов в составе исследуемого стекла. Значения величин, входящих в выражение (3.65), и результаты вычислений представим в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Результаты расчета относительного содержания атомов элементов в составе исследуемого стекла

Элемент	$[\varepsilon]_j^i, \times 10^{-15}$ эВ/(атом/см ²)	Сечение рассеяния σ_j , $\times 10^{-24}$ см ² /ср	Высота сигнала H_j , имп.	N_j / N_{Si}
O	89,59	0,297	4790	2,90
Na	91,91	0,599	1280	0,40
Si	92,65	0,991	5335	1,00
K	93,66	1,861	1950	0,19
Nd	96,98	18,92	5160	0,05

На основе проведенных измерений и литературных данных можно заключить, что в состав исследуемого стекла входит SiO₂, который является основным стеклообразующим компонентом, а также Na₂O и K₂O в качестве модификаторов.

Кроме того, содержится добавка оксида неодима Nd₂O₃. Силикатное стекло, содержащее неодим, используется в качестве активной среды твердотельных лазеров. Ионы Nd³⁺ являются ионами-активаторами, обеспечивающими инверсию населенностей и лазерные переходы.

Пример 19. Анализ слоя силицида молибдена, сформированного на поверхности кремния

Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов ⁴He, снятый для исследуемого образца, приведен в табл. 3.12. Так же как и в примере 18, в первом столбце таблицы указаны номера каналов спектрометра (через

10 каналов), а в остальных столбцах – выход обратного рассеяния, соответствующий каждому из каналов, в импульсах, генерируемых поверхностно-барьерным кремниевым детектором. Начальная энергия анализирующих ионов ^4He составляла 1,5 МэВ; угол рассеяния $\theta = 170^\circ$; углы, отсчитанные от нормали к поверхности исследуемого образца (см. рис. 2.70), $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 10^\circ$. В табл. 3.13 приведены данные для калибровки шкалы спектрометра.

Таблица 3.12

Распечатка спектра обратного рассеяния

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	15310	14910	14022	14069	13986	13745	13195	13075	13057	12682
50	12555	12182	11933	11629	11392	11468	11307	11102	10837	10962
60	10607	10641	10371	10378	10166	10192	9916	9886	9748	9974
70	9500	9485	9491	9255	9386	9384	9146	8916	8976	8921
80	8913	8802	8548	8680	8724	8726	8466	8402	8403	8484
90	8262	8227	8289	8250	8070	8025	8009	7928	7960	7821
100	7841	7895	7615	7898	7567	7708	7486	7475	7596	7565
110	7523	7252	7345	7542	7205	7325	7465	7385	7423	6965
120	7588	7458	7458	7622	7395	7306	7112	6961	7006	6891
130	6864	6842	6904	6940	6798	6730	6770	6750	6801	6773
140	6652	6682	6516	6641	6539	6587	6539	6467	6413	6429
150	6296	6254	6363	6317	6346	6356	6497	6159	6160	6082
160	5425	5034	4255	3525	2952	2512	2289	2054	2007	1922
170	1888	1801	1749	1749	1761	1720	1789	1750	1662	1773
180	1737	1814	1713	1703	1707	1709	1672	1706	1745	1643
190	1652	1581	1465	1415	1072	781	471	310	240	206
200	145	149	133	108	82	98	95	91	87	97
210	93	77	84	78	110	82	81	102	87	97
220	80	97	96	86	87	74	80	87	97	101
230	99	96	106	119	104	125	120	110	125	102
240	132	127	119	160	202	206	230	271	281	357
250	466	674	1043	1690	2676	4358	6418	9135	11787	14466
260	16885	18578	19285	19556	20413	20298	20072	20420	20314	20279
270	20279	20076	20097	20051	20022	19941	19988	19947	19880	19495
280	19641	19787	19703	19640	19586	19487	19430	18959	19200	18627
290	18039	16899	15436	13450	11164	8596	6483	4215	2515	1369
300	665	396	279	196	167	168	160	153	151	142
310	143	135	164	157	145	148	134	123	104	103
320	79	89								

Таблица 3.13

Данные для калибровки шкалы спектрометра

Элемент	C	O	Si	In
Канал анализатора	89	126	198	308

По данным табл. 3.12 построим спектр обратного рассеяния, откладывая по оси абсцисс номер канала многоканального анализатора, а по оси ординат – выход рассеяния (рис. 3.19).

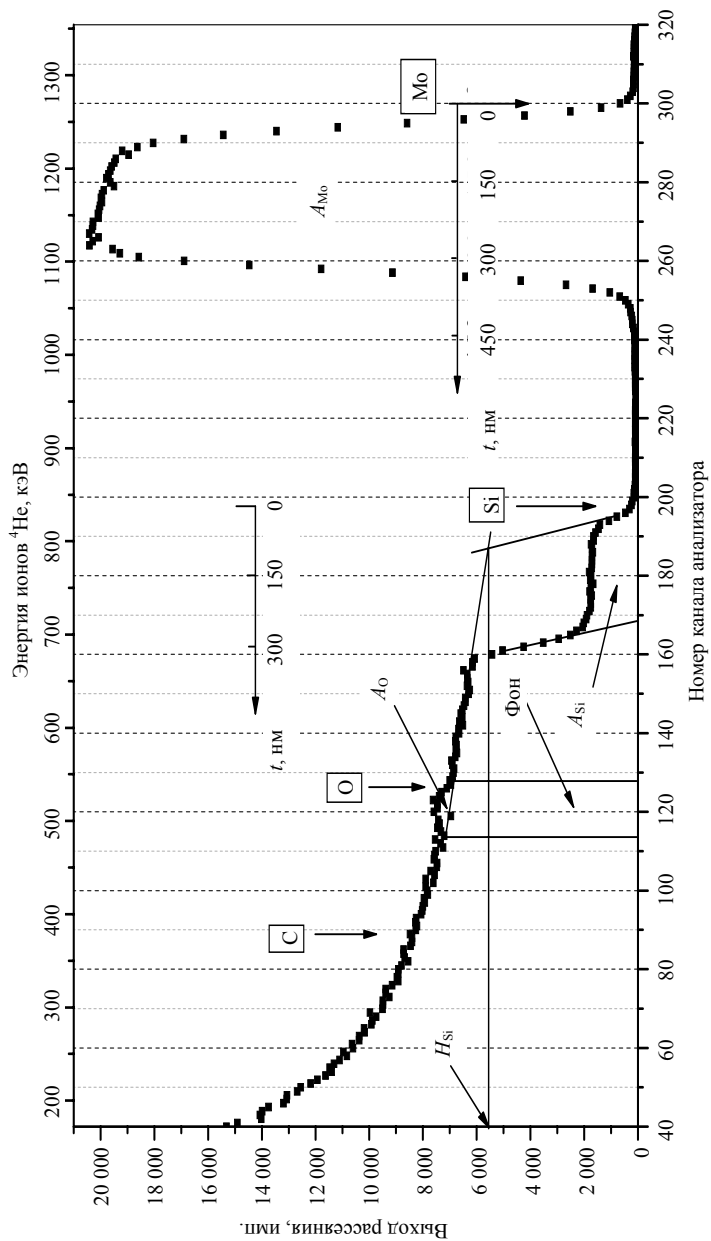


Рис. 3.19. Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He от слоя силицида молибдена на кремниевой подложке

С применением формулы (2.154) и значений кинематического фактора рассеяния K из прил. 10 так же, как и в предыдущем примере, определим значение энергетической ширины канала спектрометра δE . Значения K и результаты вычислений внесем в табл. 3.14. При дальнейшей обработке спектра будем использовать полученное среднее значение $\delta E = 4,222$ кэВ/канал.

Таблица 3.14

Результаты расчета энергетической ширины канала спектрометра

Элемент	K	E , кэВ	δE , кэВ/канал		
			Пара	Значение	Среднее
C	0,2526	378,90	In – C	4,234	4,222
O	0,3625	543,75	In – O	4,188	
Si	0,5657	848,55	In – Si	4,159	
In	0,8707	1306,05	Si – C	4,309	
Mo	0,8473	1270,95	–	–	–

В исследуемом образце содержатся кремний и молибден. Поэтому нужно дополнительно рассчитать значение энергии ионов ^4He после их рассеяния на ядрах атомов молибдена. Это значение также внесено в табл. 3.14.

Отметим на спектре (рис. 3.19) заданные в табл. 3.13 каналы с номерами 89, 126 и 198, которые соответствуют значениям энергии ионов ^4He , претерпевших рассеяние на ядрах атомов соответственно углерода, кислорода и кремния, расположенных на поверхности образца.

На спектре имеется сигнал, соответствующий кислороду, а канал, соответствующий углероду, можно использовать для привязки при переходе к шкале энергий.

Ближайшее к $E_C = 378,9$ кэВ значение энергии равно 400 кэВ. Разность этих значений равна 21,1 кэВ, и ей соответствует 5 каналов. Следовательно, значению энергии $E = 400$ кэВ соответствует 94-й канал. Интервалу энергий в 100 кэВ соответствует $100 / 4,222 = 23,7$ канала. С использованием этих данных осуществим переход от шкалы «Номер канала» к шкале «Энергия ионов» (верхняя шкала на рис. 3.19).

Определим также номер канала, соответствующий энергии ионов ^4He после их рассеяния на ядрах атомов молибдена, расположенных на поверхности, $E_{\text{Mo}} = 1270,95$ кэВ. Этой энергии соответствует примерно 300-й канал.

Построим шкалу глубин для кремния и молибдена, т. е. определим толщину слоя δt , соответствующую одному каналу анализатора. Вычисление значений δt осуществляется по формуле (2.155). Атомная плотность кремния $N = 5,00 \cdot 10^{22}$ атом/см³ (прил. 10). Вначале рассчитаем по формуле (3.66) значения фактора тормозного сечения ионов ^4He в среде

при рассеянии на ядрах кремния и молибдена, а затем вычислим значения δt для каждого из этих элементов.

Соответствующие вычисления:

$$\begin{aligned} [\varepsilon]_{\text{Si}}^{\text{Si}} &= \left[\frac{0,5657}{\cos 0^\circ} \cdot 56,82 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 68,68 \right] \cdot 10^{-15} = \\ &= 101,88 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\varepsilon]_{\text{Mo}}^{\text{Si}} &= \left[\frac{0,8473}{\cos 0^\circ} \cdot 56,82 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 61,12 \right] \cdot 10^{-15} = \\ &= 110,21 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}; \end{aligned}$$

$$\delta t_{\text{Si}} = \frac{4222}{5 \cdot 10^{22} \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} = 8,29 \cdot 10^{-7} \text{ см/канал} = 8,29 \text{ нм/канал};$$

$$\delta t_{\text{Mo}} = \frac{4222}{5 \cdot 10^{22} \cdot 110,22 \cdot 10^{-15}} = 7,66 \cdot 10^{-7} \text{ см/канал} = 7,66 \text{ нм/канал}.$$

Значения δt для кремния и молибдена несколько различаются. Нанесем полученную для каждого из элементов шкалу глубин на спектр (рис. 3.19).

По этим шкалам определим толщину слоя силицида. Рассеянию ионов ^4He на ядрах атомов молибдена отвечает спектральный пик в интервале энергий, которому соответствуют каналы с 240-го по 310-й. Энергии ионов, претерпевших рассеяние на ядрах атомов Mo, расположенных на поверхности образца, соответствует 300-й канал. Оба края (правый и левый) спектрального пика размываются вследствие ограничений по разрешающей способности спектрометра. Толщине слоя, содержащего атомы молибдена, соответствует интервал с 300-го по 257-й канал. Следовательно, толщина слоя силицида молибдена $t_{\text{Mo}} = (300 - 257) \cdot 7,66 = 329 \text{ нм}$. Кремнию, входящему в состав силицида молибдена, соответствует сигнал, расположенный в интервале со 163-го по 198-й канал. Толщина слоя силицида, определенная по сигналу кремния, $t_{\text{Si}} = (198 - 163) \cdot 8,29 = 290 \text{ нм}$. Среднее значение толщины исследуемого слоя равно примерно 310 нм. На остальном участке спектра, которому соответствуют номера каналов меньше 163-го, наблюдается сигнал от кремниевой подложки. На фоне сигнала от подложки имеется спектральный пик кислорода, атомы которого находятся на самой поверхности и вероятнее всего входят в состав поверхностных оксидов.

Рассчитаем слоевые содержания атомов молибдена и кремния в слое силицида, а также кислорода на его поверхности. Слоеое содержание вычисляется по формуле (2.162):

$$(Nt)_j = \frac{A_j \sigma_i \delta E}{H_i \sigma_j [\varepsilon]_i}, \quad (3.67)$$

где A_j – площадь под спектральным пиком соответствующего элемента с учетом вычета фона (т. е. интенсивность спектрального пика); H_i – высота сигнала от основного материала (матрицы).

Высота сигнала от кремниевой матрицы определяется по ординате точки пересечения касательных к участкам спектра, соответствующим рассеянию ионов ^4He на ядрах атомов кремния, расположенных на поверхности матрицы (см. рис. 3.19). Полученное значение $H_i = H_{\text{Si}} = 5587$ имп. Спектральный пик молибдена фона не имеет, поэтому площадь под пиком можно определить по распечатке спектра (табл. 3.12) как сумму значений выхода в интервале с 240-го по 310-й канал. Результат суммирования $A_{\text{Mo}} = 745\,720$ имп.·канал. Слоеое содержание атомов молибдена в исследуемом слое

$$(Nt)_{\text{Mo}} = \frac{745\,720 \cdot 0,991 \cdot 4222}{5587 \cdot 9,253 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} = 5,92 \cdot 10^{17} \text{ атом/см}^2.$$

Площадь под спектральным пиком кремния в составе силицида определим по данным табл. 3.12 как сумму выходов в интервале со 163-го по 203-й канал за вычетом фона. Результат вычислений: $A_{\text{Si}} = 52\,970$ имп.·канал. Слоеое содержание атомов кремния в исследуемом слое

$$(Nt)_{\text{Si}} = \frac{52\,970 \cdot 0,991 \cdot 4222}{5587 \cdot 0,991 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} = 3,93 \cdot 10^{17} \text{ атом/см}^2.$$

По полученным данным можно оценить стехиометрический состав силицида. Отношение слоевых содержаний

$$\frac{(Nt)_{\text{Mo}}}{(Nt)_{\text{Si}}} \approx 1,5 = \frac{3}{2}.$$

Следовательно, стехиометрический состав слоя можно представить формулой Mo_3Si_2 .

Рассчитаем также слоеое содержание кислорода на поверхности исследуемого слоя. Спектральный пик кислорода на фоне сигнала кремниевой подложки расположен в интервале со 113-го по 128-й канал. Площадь под пиком кислорода за вычетом фонового сигнала $A_{\text{O}} = 8105$ имп.·канал. Слоеое содержание кислорода

$$(Nt)_{\text{O}} = \frac{8105 \cdot 0,991 \cdot 4222}{5587 \cdot 0,297 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} = 2,00 \cdot 10^{17} \text{ атом/см}^2.$$

Пример 20. Анализ поверхности монокристаллического кремния, легированного мышьяком и индием методом ионной имплантации

Спектрометрия резерфордовского обратного рассеяния позволяет исследовать состав тонкого (примерно до 1 мкм) приповерхностного слоя вещества и распределение состава по глубине без его разрушения (без ионного распыления). Поэтому спектрометрия обратного рассеяния широко применяется для анализа структур, формируемых методами поверхностного легирования, в том числе получаемых имплантацией ускоренных в вакууме ионов. Ионная имплантация применяется для введения электрически активных примесей (донорных или акцепторных) в полупроводниковую матрицу, что является одной из технологических операций в микроэлектронной промышленности.

Рассмотрим два спектра резерфордовского обратного рассеяния ионов ${}^4\text{He}$, снятых для одного и того же образца монокристаллического кремния, легированного ускоренными ионами мышьяка и индия. Первый из спектров снят от неориентированного монокристалла, второй – от ориентированного по отношению к пучку анализирующих ионов таким образом, что ионы входят в кристалл в направлении межплоскостного канала (режим каналирования). Предварительно в монокристаллическую кремниевую пластину-подложку имплантированы ионы As^+ с энергией 60 кэВ и In^+ с энергией 40 кэВ.

Распечатка спектра, снятого от неориентированного монокристалла, приведена в табл. 3.15. Спектр снят в тех же условиях, что и в примере 19. Начальная энергия анализирующих ионов ${}^4\text{He}$ составляла 1,5 МэВ; угол рассеяния $\theta = 170^\circ$; углы, отсчитанные от нормали к поверхности исследуемого образца, $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 10^\circ$. Данные для калибровки шкалы спектрометра не изменены по сравнению с предыдущим спектром и приведены в табл. 3.13.

По распечатке (табл. 3.15) построим спектр обратного рассеяния (рис. 3.20). Спектральные пики, соответствующие рассеянию ионов ${}^4\text{He}$ на ядрах имплантированных атомов мышьяка и индия, имеют малую интенсивность по сравнению с интенсивностью сигнала от кремниевой подложки. Поэтому эти пики можно для наглядности построить дополнительно в другом масштабе.

С использованием данных табл. 3.13 отметим на спектре (рис. 3.20) каналы, соответствующие энергиям ионов, претерпевших рассеяние на ядрах атомов элементов, входящих в состав исследуемого слоя.

На самой поверхности образца обнаруживается некоторое количество кислорода. Остается определить номер канала, соответствующего рассеянию на ядрах атомов мышьяка. Поскольку условия получения спектра такие же, как и в примере 19, то значение энергетической ширины канала

спектрометра $\delta E = 4,222$ кэВ/канал (см. табл. 3.14). Значение энергии ионов ^4He , претерпевших резерфордское рассеяние на ядрах атомов As, расположенных на поверхности, $E_{\text{As}} = 0,8087 \cdot 1500 = 1213,05$ кэВ. Этой энергии соответствует примерно 287-й канал спектрометра.

Таблица 3.15

**Распечатка спектра обратного рассеяния,
снятого от неориентированного монокристалла кремния**

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
80	8433	8531	8371	8346	8340	8042	8124	7965	8031	8220
90	7739	7836	7895	7561	7574	7681	7519	7438	7278	7362
100	7289	7201	7268	7269	7064	7115	7030	6960	7034	6866
110	6880	6871	6962	6768	6762	6902	6717	6791	6677	6701
120	6667	6617	6595	6492	6587	6693	6782	6648	6635	6495
130	6481	6376	6561	6334	6374	6329	6407	6176	6187	6240
140	6157	6211	6060	6244	6311	6143	6190	6186	6094	6146
150	5976	6084	5968	5994	6019	6020	6048	5968	5906	5787
160	5973	5984	5819	5834	5849	5743	5767	5876	5607	5654
170	5641	5774	5793	5757	5582	5531	5693	5726	5466	5589
180	5383	5428	5421	5441	5304	5493	5315	5265	5166	5163
190	5152	4934	4957	4980	4954	4809	4344	3712	2680	1727
200	957	563	391	289	212	131	133	70	49	48
210	39	34	34	35	37	23	21	26	31	27
220	22	23	20	24	22	12	17	15	22	15
230	15	19	23	8	11	14	14	12	18	17
240	14	19	13	12	17	8	13	9	8	13
250	7	19	11	6	9	10	7	8	7	15
260	9	9	9	12	10	11	9	7	13	12
270	18	23	23	32	48	70	87	104	135	122
280	134	120	86	78	38	26	15	12	5	10
290	11	11	15	19	28	61	82	128	168	220
300	246	248	267	251	163	114	69	31	21	6
310	4	12	4	2	5	3	3	2	8	2

Используя привязку к сигналу углерода и значение δE , так же как и в предыдущих примерах, осуществим калибровку шкалы спектрометра по энергиям (верхняя шкала на рис. 3.20).

Построим шкалу глубин для элементов, входящих в состав анализируемого слоя. Сначала рассчитаем по формуле (3.66) значения фактора тормозного сечения ионов ^4He в среде при рассеянии на ядрах мышьяка и индия, а затем определим значения δt .

Значения этих параметров для кремния вычислены в предыдущем примере. Для торможения ионов ^4He , рассеивающихся на ядрах атомов кремния, фактор тормозного сечения $[\varepsilon]_{\text{Si}}^{\text{Si}} = 101,88 \cdot 10^{-15}$ эВ/(атом/см²); соответствующее значение $\delta t_{\text{Si}} = 8,29$ нм/канал.

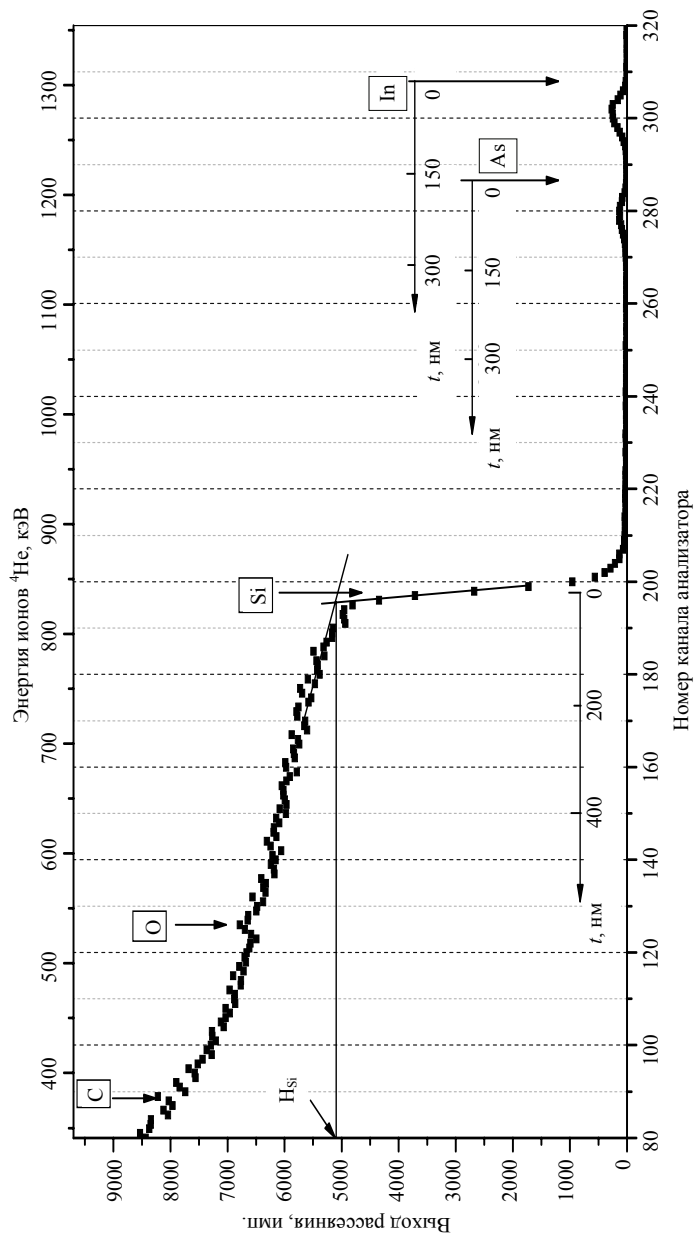


Рис. 3.20. Спектр резерфордовского обратного рассеяния ионов ^4He от неориентированного монокристалла кремния, легированного ионами As^+ и In^+ .

Вычислим значения фактора тормозного сечения ионов ^4He в кремнии при рассеянии на ядрах мышьяка и индия:

$$\begin{aligned} [\varepsilon]_{\text{As}}^{\text{Si}} &= \left[\frac{0,8087}{\cos 0^\circ} \cdot 56,82 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 62,25 \right] \cdot 10^{-15} = \\ &= 109,16 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}; \\ [\varepsilon]_{\text{In}}^{\text{Si}} &= \left[\frac{0,8707}{\cos 0^\circ} \cdot 56,82 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 60,44 \right] \cdot 10^{-15} = \\ &= 110,85 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}. \end{aligned}$$

Определим значения толщины слоя δt , соответствующей одному каналу спектрометра:

$$\delta t_{\text{As}} = \frac{4222}{5 \cdot 10^{22} \cdot 109,16 \cdot 10^{-15}} = 7,74 \cdot 10^{-7} \text{ см/канал} = 7,74 \text{ нм/канал};$$

$$\delta t_{\text{In}} = \frac{4222}{5 \cdot 10^{22} \cdot 110,85 \cdot 10^{-15}} = 7,62 \cdot 10^{-7} \text{ см/канал} = 7,62 \text{ нм/канал}.$$

Нанесем шкалу глубин для каждого элемента на спектр (рис. 3.20).

Рассчитаем по формуле (3.67) слоевые содержания имплантированных атомов мышьяка и индия. Высота сигнала от кремниевой матрицы определяется по ординате точки пересечения касательных к участкам спектра, соответствующим рассеянию ионов ^4He на ядрах атомов кремния, расположенных на поверхности матрицы (см. рис. 3.20). Полученное значение $H_i = H_{\text{Si}} = 5096$ имп. Спектральные пики мышьяка и индия практически не имеют фона, поэтому площадь под пиками можно определить по распечатке спектра (табл. 3.15) как сумму значений выхода в соответствующих интервалах каналов. Результат суммирования: $A_{\text{As}} = 1184$ имп.канал; $A_{\text{In}} = 2141$ имп.канал. Слоеые содержания ионно-имплантированных атомов донорных (As) и акцепторных (In) примесей в исследуемом слое:

$$(Nt)_{\text{As}} = \frac{1184 \cdot 0,991 \cdot 4222}{5096 \cdot 5,700 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} = 1,67 \cdot 10^{15} \text{ атом/см}^2;$$

$$(Nt)_{\text{In}} = \frac{2141 \cdot 0,991 \cdot 4222}{5096 \cdot 12,608 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} = 1,37 \cdot 10^{15} \text{ атом/см}^2.$$

Ионно-имплантируемые атомы вследствие многократных столкновений с атомами кремния распределяются в приповерхностном слое случайным образом. В то же время глубина их проникновения зависит от энергии ускоренных в вакууме ионов. Проанализируем по спектру обратного рассеяния профили распределения внедренных атомов в кремниевой подложке по глубине.

Для этого по формуле (2.160)

$$\frac{N_j}{N_i} = \left[\frac{\sigma_i [\varepsilon]_j^i}{\sigma_j [\varepsilon]_i^j} \right] \frac{H_j}{H_i} \quad (3.68)$$

рассчитаем отношение концентраций атомов элементов (мышьяка и индия по отношению к кремнию) пошагово на различных глубинах. Вычисление относительных концентраций по формуле (3.68) начнем от поверхности. При этом в качестве высот сигналов H_j и H_i берутся значения выхода рассеяния для соответствующих каналов анализатора из распечатки спектра. В частности, расчет первых из значений отношений N_{As}/N_{Si} и N_{In}/N_{Si} выглядит следующим образом:

$$\left(\frac{N_{As}}{N_{Si}} \right)_1 = \left[\frac{0,991 \cdot 109,16 \cdot 10^{-15}}{5,700 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} \right] \cdot \frac{12}{2680} = 0,1863 \cdot \frac{12}{2680} = 8,34 \cdot 10^{-4};$$

$$\left(\frac{N_{In}}{N_{Si}} \right)_1 = \left[\frac{0,991 \cdot 110,85 \cdot 10^{-15}}{12,608 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} \right] \cdot \frac{21}{2680} = 0,0855 \cdot \frac{21}{2680} = 6,70 \cdot 10^{-4}.$$

Последующие значения вычисляются аналогичным образом с использованием значений высот сигналов «на канал глубже». Результаты расчетов представим в табл. 3.16. При определении глубины t в качестве шкалы глубин примем среднее значение δt для всех трех элементов, входящих в состав анализируемого слоя: $\delta t = 7,88$ нм/канал.

Таблица 3.16

Результаты расчета распределений атомов As и In по глубине

Глубина, нм	$N_{As}/N_{Si}, \times 10^{-4}$	$N_{In}/N_{Si}, \times 10^{-4}$
0	8,34	6,70
7,88	7,53	7,14
15,76	11,15	13,58
23,64	14,72	20,27
31,52	29,33	28,14
39,40	32,17	43,10
47,28	45,10	46,06
55,16	50,60	42,99
63,04	44,12	40,84
70,92	48,71	36,44
78,80	37,51	27,81
86,68	30,78	20,79
94,56	24,54	13,19
102,44	16,28	9,50
110,32	11,24	4,51
118,20	7,88	2,99
126,08	7,90	2,37

Окончание табл. 3.16

Глубина, нм	$N_{\text{As}} / N_{\text{Si}}, \times 10^{-4}$	$N_{\text{In}} / N_{\text{Si}}, \times 10^{-4}$
133,96	6,18	1,73
141,84	4,15	1,75
149,72	4,33	1,53
157,60	2,39	0,78
165,48	2,93	—
173,36	3,60	—
181,24	3,37	—
189,12	4,00	—
197,00	2,91	—
204,88	2,89	—
212,76	2,90	—
220,64	4,95	—
228,52	2,31	—
236,40	2,66	—
244,28	2,22	—
252,16	3,23	—
260,04	2,92	—
267,92	1,91	—

По расчетным данным построим графики профилей распределения ионно-имплантированных атомов по глубине (рис. 3.21). Поскольку процесс торможения ионов в кристаллической подложке является вероятностным, то полученные данные можно аппроксимировать функцией нормального распределения Гаусса (кривые на рис. 3.21).

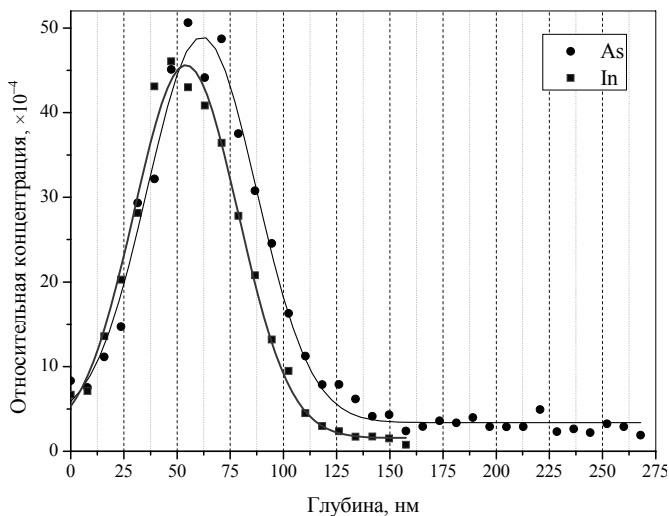


Рис. 3.21. Распределение атомов As и In, ионно-имплантированных в кремниевую подложку, по глубине

Основными параметрами распределения атомов ионно-имплантированных примесей по глубине являются: средний проекционный пробег \bar{R}_p ионов и среднеквадратичный разброс пробегов (страгглинг) $\Delta\bar{R}_p$, а также относительная концентрация в максимуме распределения. Значения этих параметров, полученные при анализе распределений (рис. 3.21) представлены в табл. 3.17.

Таблица 3.17

Параметры распределения по глубине ионно-имплантированных атомов

Атомы	\bar{R}_p , нм	$\Delta\bar{R}_p$, нм	$(N_i / N_{Si})_{\max}$
As	61,65	51,17	0,00488
In	54,17	48,83	0,00456

Распечатка спектра, снятого в тех же условиях, от того же образца кремния, легированного ионами мышьяка и кремния, но уже от ориентированного по отношению к направлению пучка анализирующих ионов ^4He монокристалла приведена в табл. 3.18. Спектр, построенный по этим данным, представлен на рис. 3.22 (спектр 2).

Таблица 3.18

Распечатка спектра обратного рассеяния,
снятого от ориентированного монокристалла кремния

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
70	4188	4035	3936	3952	3818	3864	3840	3761	3762	3696
80	3765	3574	3579	3558	3550	3597	3545	3519	3477	3488
90	3217	3300	3289	3292	3189	3033	3221	3126	3079	3023
100	2958	2962	2970	2936	2798	2969	2920	3037	2819	2828
110	2731	2780	2715	2721	2668	2578	2646	2582	2666	2668
120	2560	2548	2633	2613	2593	2462	2595	2582	2517	2432
130	2420	2367	2449	2314	2326	2393	2344	2382	2273	2325
140	2299	2312	2248	2190	2209	2183	2124	2154	2132	2158
150	2199	2107	2085	2011	1986	2106	2085	1981	2015	2061
160	1918	1905	1937	1936	1855	1907	1960	1873	1854	1834
170	1792	1855	1802	1788	1819	1743	1725	1696	1713	1862
180	1784	1843	2002	2231	2792	3515	4284	4789	5068	5157
190	5055	5078	5227	5264	5028	4927	4323	3422	2356	1313
200	692	401	305	220	173	137	76	41	31	21
210	14	14	9	17	6	7	4	13	7	9
220	11	10	7	8	6	4	4	3	4	5
230	7	5	2	7	6	6	5	2	3	8
240	2	9	7	4	2	6	6	3	5	4
250	3	1	9	1	3	1	2	1	1	3
260	5	1	3	5	3	4	3	5	6	3
280	130	107	70	55	28	9	5	2	7	8
290	8	8	11	15	32	64	83	144	196	244
300	242	292	258	202	135	104	59	29	8	2
310	2	3	3	0	1	3	0	0	0	2

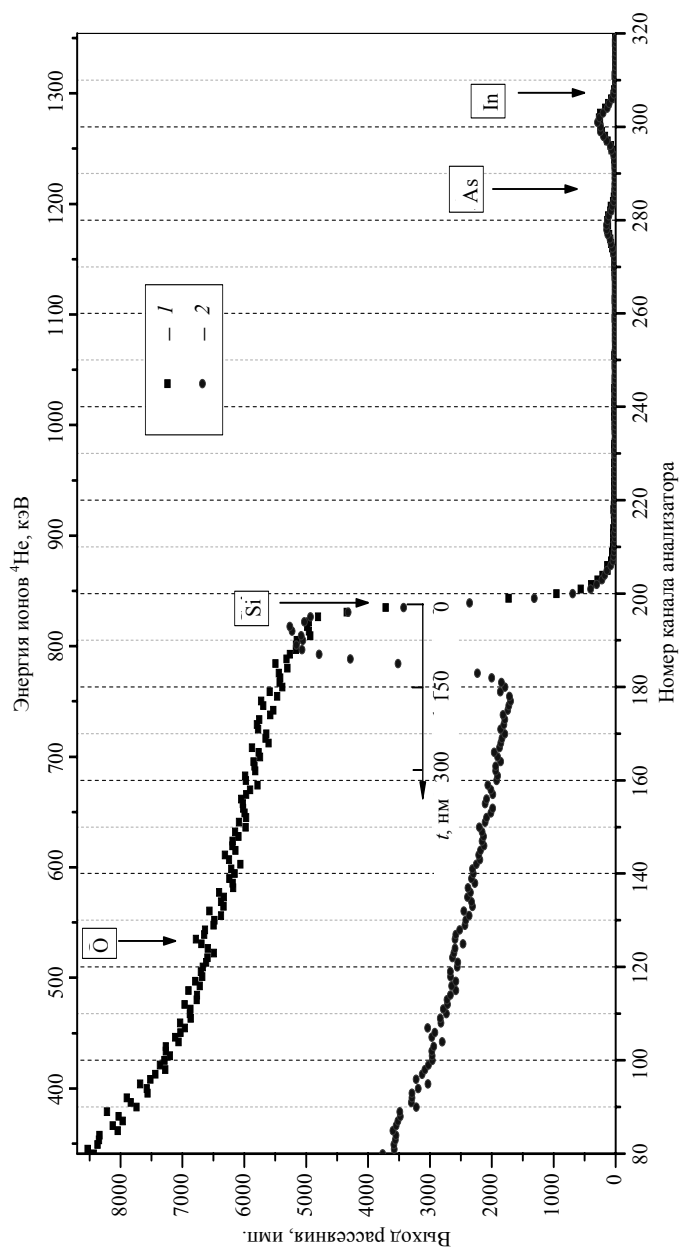


Рис. 3.22. Спектры резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He от неориентированного (1) и ориентированного (2) монокристалла кремния, легированного ионами As^- и In^- .

При каналировании ионы ^4He рассеиваются на поверхностных атомах кристалла и атомах, смещенных из узлов кристаллической решетки. Поэтому участок спектра, обусловленный рассеянием анализирующих ионов на ядрах атомов кремния, характеризуется намного меньшей интенсивностью, чем в спектре 1 (рис. 3.22), снятом от неориентированного кристалла.

Наблюдаемый спектральный пик в интервале примерно со 180-го по 210-й канал обусловлен наличием приповерхностного разупорядоченного слоя. Разрушение кристаллической решетки происходит под воздействием имплантируемых ионов, многократно сталкивающихся с атомами кристалла при торможении. Интенсивность пика достигает интенсивности спектра от неориентированного монокристалла, что свидетельствует о полной аморфизации приповерхностного слоя. По шкале глубин (рис. 3.22) оценим толщину аморфизованного слоя. Она составляет примерно 120 нм; это значение коррелирует с толщиной ионно-легированного слоя (см. рис. 3.21).

Пример 21. Исследование углеродной пленки, осажженной на кремний

Распечатка спектра резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He с начальной энергией $E_0 = 2,0$ МэВ от углеродной пленки, осажженной на кремниевую подложку, приведена в табл. 3.19. Угол рассеяния $\theta = 170^\circ$, углы $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 10^\circ$. Данные для калибровки энергетической шкалы спектрометра приведены в табл. 3.20.

Таблица 3.19

Распечатка спектра обратного рассеяния

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	6255	6242	6056	5905	5931	5702	5503	5509	5414	5388
50	5285	5193	5145	4972	4866	5020	4851	4865	4659	4723
60	4587	4645	4496	4338	4336	4430	4321	4364	4259	4158
70	4137	4236	4128	4140	4047	4058	4008	4035	4218	4243
80	4378	4430	4388	4434	4417	4301	4318	4301	4376	4334
90	4196	4279	4203	4165	4258	4307	4096	4091	4193	3970
100	4175	4005	3952	4024	4119	4038	3795	3773	3824	3856
110	3906	3680	3710	3581	3517	3342	3243	3200	3106	3164
120	3173	3107	3055	3158	3072	3002	3146	3051	2990	3067
130	2994	2960	2962	2936	2902	3014	2943	2929	2902	2832
140	2827	2976	2850	2836	2897	2833	2777	2815	2837	2903
150	2840	2759	2771	2841	2801	2808	2709	2774	2661	2787
160	2712	2620	2643	2697	2744	2697	2634	2613	2567	2744
170	2563	2550	2586	2559	2689	2682	2613	2522	2560	2605
180	2543	2570	2480	2559	2526	2520	2617	2510	2576	2595

Окончание табл. 3.19

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
190	2514	2503	2482	2551	2458	2450	2498	2409	2390	2437
200	2421	2454	2348	2503	2524	2477	2427	2458	2394	2374
210	2355	2349	2294	2306	2287	2279	2259	2129	1967	1695
220	1477	1086	784	583	368	285	180	155	128	114
230	93	77	52	43	56	33	35	21	23	18
240	19	21	16	25	22	23	21	13	17	11
250	26	14	19	11	14	8	19	18	12	16
260	16	9	11	15	13	16	13	7	12	9
270	11	7	7	13	11	9	13	6	10	9
280	8	6	6	10	11	6	10	9	6	8
290	1	6	7	9	5	8	9	6	7	7

Таблица 3.20

Данные для калибровки шкалы спектрометра

Элемент	C	O	Si	Pt
Канал анализатора	116	166	265	438

Спектр обратного рассеяния, соответствующий табл. 3.19, представлен на рис. 3.23. По данным табл. 3.20 определим по методике, изложенной в примерах 18 и 19, энергетическую ширину δE канала спектрометра (табл. 3.21).

Отметим на спектре (рис. 3.23) каналы (по данным табл. 3.20), соответствующие энергиям ионов ^4He , претерпевших рассеяние на ядрах атомов углерода и кремния, расположенных на поверхности исследуемого образца. Отсутствие сигнала кремния в соответствующем интервале энергий обусловлено тем, что кремниевая подложка расположена под сравнительно толстой пленкой осажденного углерода.

Таблица 3.21

Результаты расчета энергетической ширины канала спектрометра

Элемент	K	E , кэВ	δE , кэВ/канал		
			Пара	Значение	Среднее
C	0,2526	505,2	Pt – C	4,157	4,147
O	0,3625	725,0	Pt – O	4,112	
Si	0,5657	1131,4	Pt – Si	4,117	
Pt	0,9218	1843,6	Si – C	4,203	

Используя среднее значение энергетической ширины канала спектрометра $\delta E = 4,147$ кэВ/канал и привязку к каналу, соответствующему какому-то из элементов (например, углероду), произведем калибровку энергетической шкалы спектрометра (верхняя шкала на рис. 3.23). Методика калибровки также подробно изложена в примерах 18 и 19.

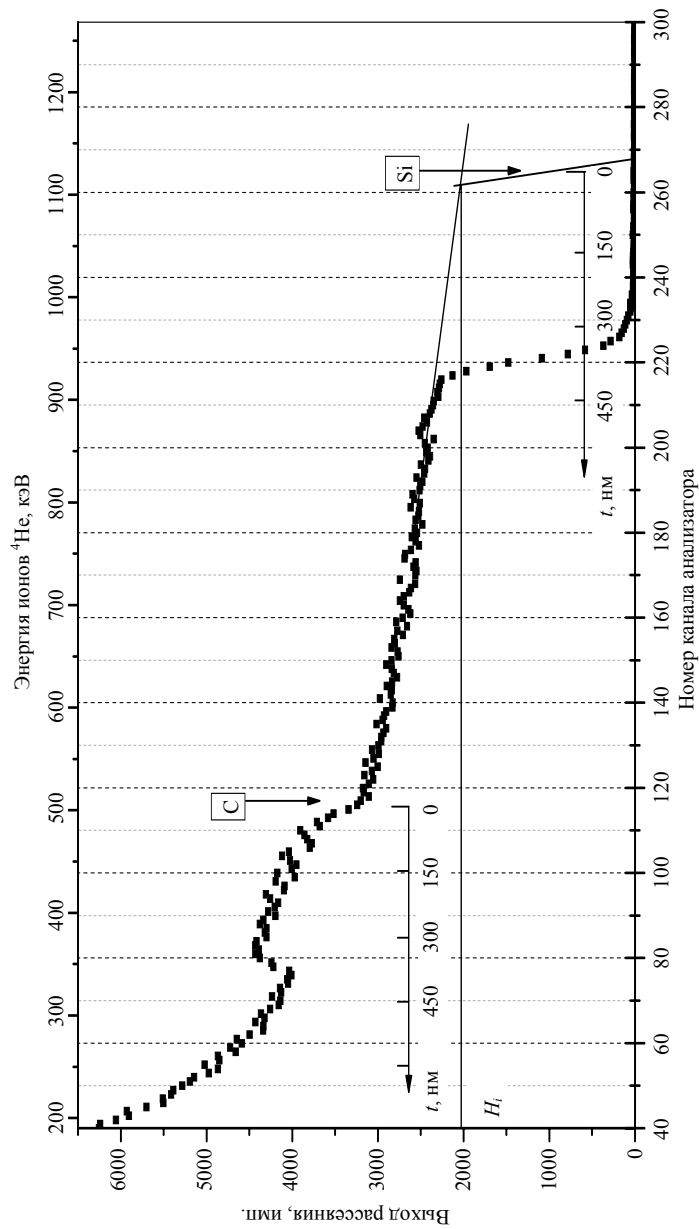


Рис. 3.23. Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He от углеродной пленки на кремниевой подложке

Построим шкалу глубин для обоих элементов, входящих в состав анализируемого слоя. Сначала рассчитаем по формуле (3.66) значения фактора тормозного сечения ионов ^4He в среде при рассеянии на ядрах кремния и углерода, а затем определим соответствующие значения δt .

Фактор тормозного сечения при рассеянии на ядрах кремния

$$\begin{aligned} [\epsilon]_{\text{Si}}^{\text{Si}} &= \left[\frac{0,5657}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 70,06 \right] \cdot 10^{-15} = \\ &= 99,01 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}, \end{aligned}$$

а на ядрах углерода

$$\begin{aligned} [\epsilon]_{\text{C}}^{\text{Si}} &= \left[\frac{0,2526}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 70,64 \right] \cdot 10^{-15} = \\ &= 84,17 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}. \end{aligned}$$

Значения глубин, соответствующих одному каналу спектрометра:

$$\delta t_{\text{Si}} = \frac{4147}{5 \cdot 10^{22} \cdot 99,01 \cdot 10^{-15}} = 8,38 \cdot 10^{-7} \text{ см/канал} = 8,38 \text{ нм/канал};$$

$$\delta t_{\text{C}} = \frac{4147}{5 \cdot 10^{22} \cdot 84,17 \cdot 10^{-15}} = 9,85 \cdot 10^{-7} \text{ см/канал} = 9,85 \text{ нм/канал}.$$

Нанесем шкалы глубин на спектр (рис. 3.23) и определим толщину углеродной пленки. Слою, содержащему углерод, соответствует на спектре интервал с 76-го по 118-й канал. С учетом размытия правого и левого краев спектра вследствие ограничений по разрешающей способности спектрометра толщина t_{C} углеродной пленки, определенная по сигналу углерода, составляет $(116 - 78) \cdot 9,85 = 374,3$ нм. Толщина углеродной пленки, определенная по сигналу кремния, равна $(265 - 221) \cdot 8,38 = 368,7$ нм. Среднее значение толщины пленки ≈ 370 нм.

Оценим плотность осажденной на подложке углеродной пленки. Вначале рассчитаем по формуле (3.67) слоевое содержание углерода. Высота сигнала от кремниевой подложки, определенная по спектру (рис. 3.23), равна 2035 импульсов. Площадь пика, соответствующего рассеянию анализирующих ионов на ядрах атомов углерода, определенная по спектру за вычетом фона, составляет 23 390 имп.·канал. Слоеое содержание углерода

$$(Nt)_{\text{C}} = \frac{23\,390 \cdot 0,991 \cdot 4147}{2035 \cdot 0,150 \cdot 99,01 \cdot 10^{-15}} = 3,18 \cdot 10^{18} \text{ атом/см}^2.$$

Атомная плотность

$$N_c = \frac{(Nt)_c}{t_c} = \frac{3,18 \cdot 10^{18}}{370 \cdot 10^{-7}} = 8,59 \cdot 10^{22} \text{ атом/см}^3.$$

Полученное значение меньше атомной плотности графита, равной $1,76 \cdot 10^{23}$ атом/см³ (см. прил.10), что вполне объяснимо, поскольку при осаждении тонкопленочных покрытий образуются рыхлые менее плотные в сравнении с массивными материалами структуры.

Пример 22. Исследование поверхности кремния,
подвергнутого анодному окислению

Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов ⁴Ne от поверхности кремния, подвергнутого электрохимическому анодному окислению, представлен в табл. 3.22 и на рис. 3.24. Начальная энергия анализирующих ионов $E_0 = 1,0$ МэВ; угол рассеяния $\theta = 104^\circ$; углы $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 76^\circ$.

Таблица 3.22

Распечатка спектра обратного рассеяния

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	3737	3632	3658	3450	3495	3408	3498	3443	3319	3253
50	3237	3249	3152	3157	3180	3035	3106	2992	2893	3045
60	2911	2984	2929	2866	2954	2920	2800	2820	2757	2746
70	2869	2724	2717	2725	2565	2574	2637	2594	2545	2606
80	2542	2523	2563	2593	2572	2513	2496	2534	2497	2425
90	2448	2477	2430	2473	2380	2357	2398	2357	2360	2355
100	2350	2370	2366	2345	2400	2374	2361	2359	2350	2318
110	2352	2305	2292	2276	2312	2259	2281	2325	2332	2238
120	2316	2311	2209	2269	2193	2296	2321	2218	2337	2268
130	2198	2170	2194	2243	2301	2114	2230	2255	2310	2246
140	2176	2247	2325	2322	2353	2318	2244	2362	2192	2261
150	2262	2218	2171	2193	2222	2213	2210	2165	2157	2208
160	2214	2243	2319	2296	2364	2394	2428	2551	2545	2614
170	2649	2603	2759	2758	2654	2758	2655	2685	2615	2649
180	2572	2389	2304	2254	2130	2168	2148	2199	2098	2158
190	2145	2166	2271	2195	2108	2135	2151	2111	2150	2030
200	2157	2107	2116	2079	2145	2124	2191	2072	2138	2076
210	2099	2167	2113	2160	2067	2031	2109	2020	2006	1949
220	1898	1775	1623	1540	1345	1348	1199	1069	957	939
230	942	840	832	818	785	774	757	754	621	577
240	435	263	178	118	90	60	56	44	42	46
250	37	39	48	41	38	38	32	36	43	50
260	45	38	43	48	41	47	35	40	42	40
270	47	31	46	38	58	47	51	55	59	46
280	54	51	53	58	60	55	46	48	53	34
290	34	26	27	21	21	20	17	12	11	13
300	11	7	9	6	2	0	4	3	1	8

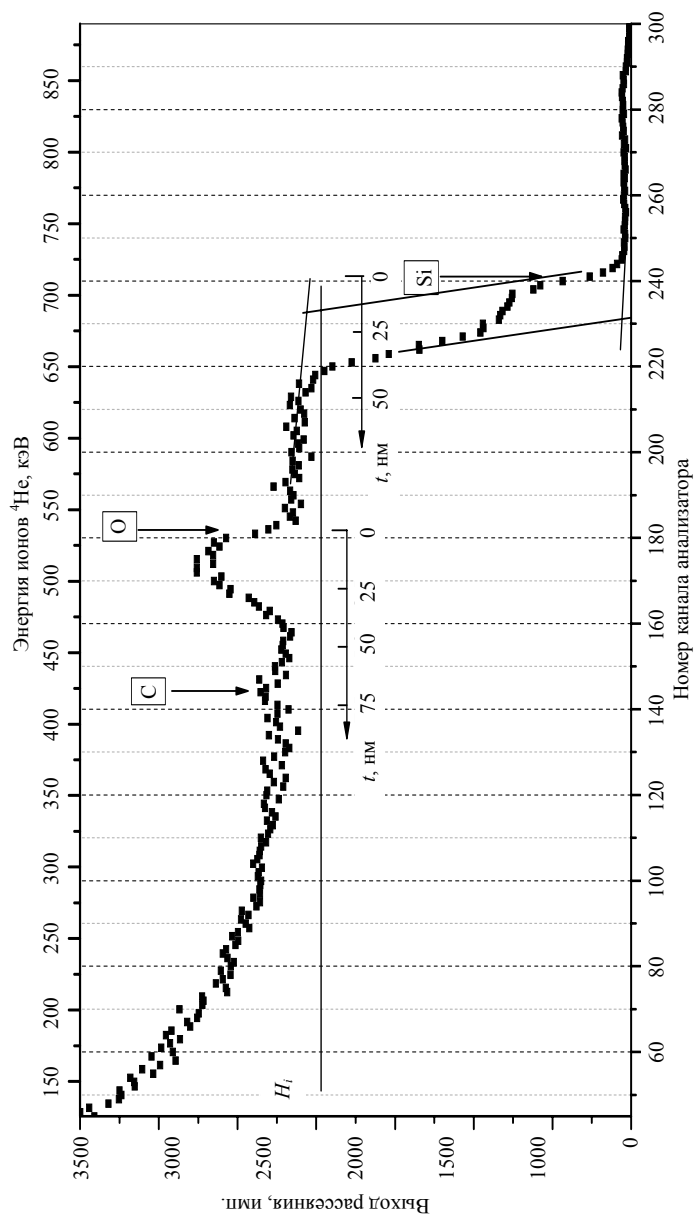


Рис. 3.24. Спектр резерфордовского обратного рассеяния ионов ^4He от поверхности кремния, подвергнутого анодному окислению

Данные для калибровки энергетической шкалы спектрометра (табл. 3.23) содержат номера каналов анализатора, соответствующих энергии анализирующих ионов после их рассеяния на ядрах атомов всех элементов, входящих в состав анализируемого слоя. Отметим эти каналы на спектре (рис. 3.24).

Таблица 3.23

Данные для калибровки шкалы спектрометра

Элемент	C	O	Si	As
Канал анализатора	144	182	241	295

С использованием данных табл. 3.23 определим по методике, изложенной в примерах 18 и 19, энергетическую ширину δE канала спектрометра (табл. 3.24). При этом, в отличие от предыдущих примеров, значения кинематического фактора рассеяния необходимо брать из прил. 10 при угле рассеяния $\theta = 104^\circ$. Среднее значение $\delta E = 2,996$ кэВ/канал.

Таблица 3.24

Результаты расчета энергетической ширины канала спектрометра

Элемент	K	E, кэВ	δE , кэВ/канал		
			Пара	Значение	Среднее
C	0,4309	430,9	As – C	2,953	2,996
O	0,5362	536,2	As – O	3,014	
Si	0,7036	703,6	As – Si	3,207	
As	0,8768	876,8	Si – C	2,811	

Используя это значение и привязку к каналу, соответствующему какому-то из элементов (например, кислороду), произведем по методике, изложенной в примерах 18 и 19, калибровку энергетической шкалы спектрометра (верхняя шкала на рис. 3.24).

Построим шкалу глубин для обоих элементов, входящих в состав анализируемого слоя. Сначала рассчитаем по формуле (3.66) значения фактора тормозного сечения ионов ^4He в среде при рассеянии на ядрах кремния и кислорода, а затем определим соответствующие значения δl .

Значения фактора тормозного сечения при рассеянии на ядрах кремния и кислорода:

$$\begin{aligned}
 [\varepsilon]_{\text{Si}}^{\text{Si}} &= \left[\frac{0,7036}{\cos 0^\circ} \cdot 66,30 + \frac{1}{\cos 76^\circ} \cdot 70,24 \right] \cdot 10^{-15} = \\
 &= 336,99 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}, \\
 [\varepsilon]_{\text{O}}^{\text{Si}} &= \left[\frac{0,5362}{\cos 0^\circ} \cdot 66,30 + \frac{1}{\cos 76^\circ} \cdot 70,79 \right] \cdot 10^{-15} = \\
 &= 328,17 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}.
 \end{aligned}$$

Значения глубин, соответствующих одному каналу спектрометра:

$$\delta t_{\text{Si}} = \frac{2996}{5 \cdot 10^{22} \cdot 336,99 \cdot 10^{-15}} = 1,78 \cdot 10^{-7} \text{ см/канал} = 1,78 \text{ нм/канал};$$

$$\delta t_{\text{O}} = \frac{2996}{5 \cdot 10^{22} \cdot 328,17 \cdot 10^{-15}} = 1,83 \cdot 10^{-7} \text{ см/канал} = 1,83 \text{ нм/канал}.$$

Сопоставляя полученные значения со значениями δt в предыдущих примерах, видим, что снятие спектра при угле рассеяния $\theta = 104^\circ$ приводит к существенному изменению шкалы глубин, что позволяет более детально исследовать очень тонкие приповерхностные слои.

Нанесем шкалы глубин на спектр (рис. 3.24). По шкалам определим толщину оксидной пленки. По сигналу кислорода

$$t_{\text{O}} = (182 - 166) \cdot 1,83 = 29,28 \text{ нм};$$

по сигналу кремния

$$t_{\text{Si}} = (241 - 224) \cdot 1,78 = 30,26 \text{ нм}.$$

Среднее значение толщины пленки $t = 29,8 \text{ нм}$.

Определим слоевое содержание кислорода и кремния в оксидной пленке (см. формулу (3.67)). Высота сигнала от кремниевой подложки, определенная по спектру (рис. 3.24), составляет 2060 имп. Площадь пика, соответствующего рассеянию анализирующих ионов на ядрах атомов кислорода, определенная по спектру за вычетом фона, равна 11 036 имп.·канал. Слоеое содержание кислорода

$$(Nt)_{\text{O}} = \frac{11\,036 \cdot 3,301 \cdot 2996}{2060 \cdot 1,050 \cdot 336,99 \cdot 10^{-15}} = 1,50 \cdot 10^{17} \text{ атом/см}^2.$$

Площадь сигнала в интервале с 224-го по 243-й канал, соответствующего рассеянию ионов ^4He на ядрах атомов кремния, входящих в состав оксида, определенная по спектру за вычетом фона, равна 14 930 имп.·канал. Слоеое содержание кремния в оксидном слое

$$(Nt)_{\text{Si}} = \frac{14\,930 \cdot 3,301 \cdot 2996}{2060 \cdot 3,301 \cdot 336,99 \cdot 10^{-15}} = 0,64 \cdot 10^{17} \text{ атом/см}^2.$$

Отношение слоевых содержаний кислорода и кремния

$$\frac{(Nt)_{\text{O}}}{(Nt)_{\text{Si}}} = \frac{1,50 \cdot 10^{17}}{0,64 \cdot 10^{17}} \approx 2,34.$$

Следовательно, в результате анодного окисления поверхности кремния образуется оксидный слой, обогащенный кислородом по сравнению со стехиометрическим оксидом кремния SiO_2 .

3.2. Контрольные задания

Успешное усвоение учебного материала дисциплины может быть обеспечено систематической работой студентов, включающей изучение теоретического материала и выполнение индивидуальных контрольных заданий.

Выполнение заданий способствует практическому закреплению и более глубокому пониманию теоретического материала. Перед выполнением контрольных заданий необходимо изучить соответствующий материал, изложенный в ч. 1 и 2, а также проработать и усвоить методику выполнения заданий, изложенную в разд. 3.1.

Степень усвоения учебного материала следует проверять, выполняя задания и отвечая на вопросы для самоконтроля.

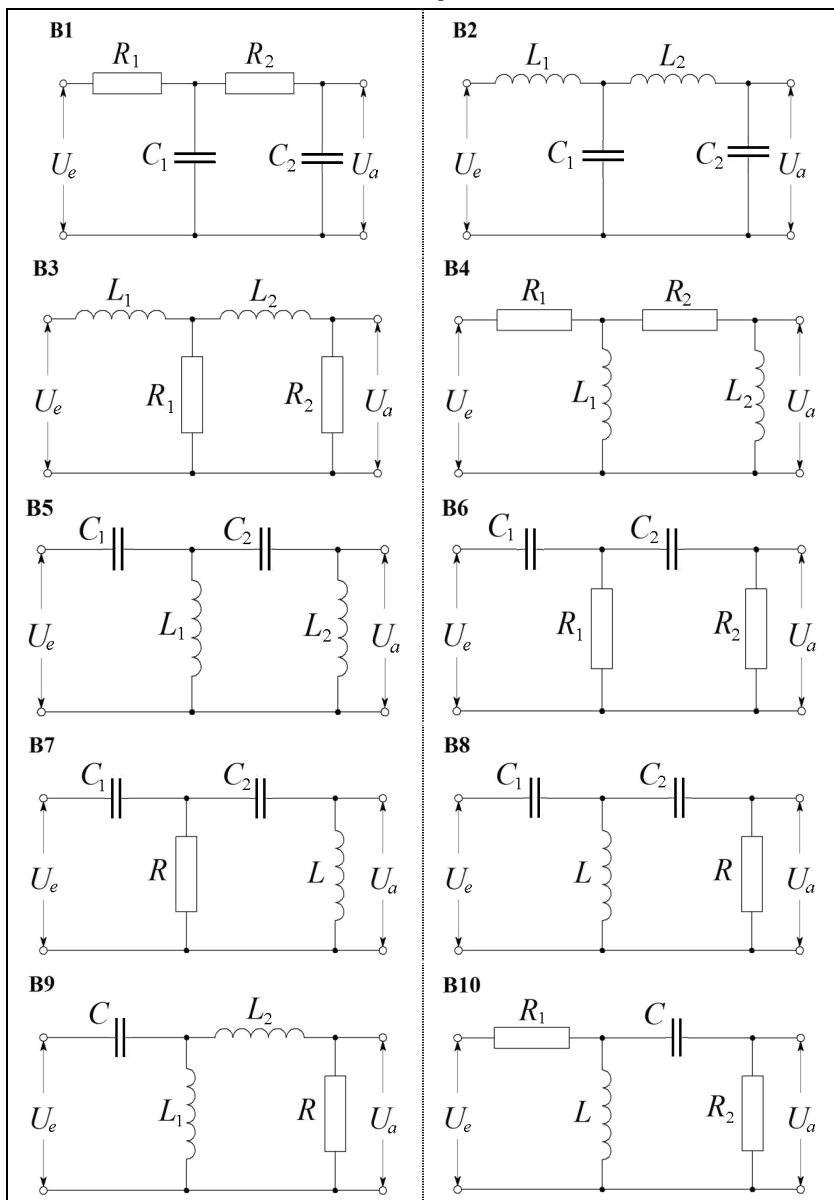
Контрольные задания должны быть выполнены самостоятельно, с учетом требований, предъявляемых к каждому из заданий. Отчет о выполнении каждого задания включает его аккуратное оформление в рабочей тетради в письменном виде и последующее собеседование по теме задания с преподавателем. Расчеты должны сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями. Результаты вычислений, как правило, необходимо представлять в виде таблиц (см. примеры, рассмотренные в разд. 3.1). Графические зависимости должны быть построены на миллиметровой бумаге либо с применением компьютера. Значения физических величин, полученные при вычислениях, необходимо записывать с указанием единиц их измерения.

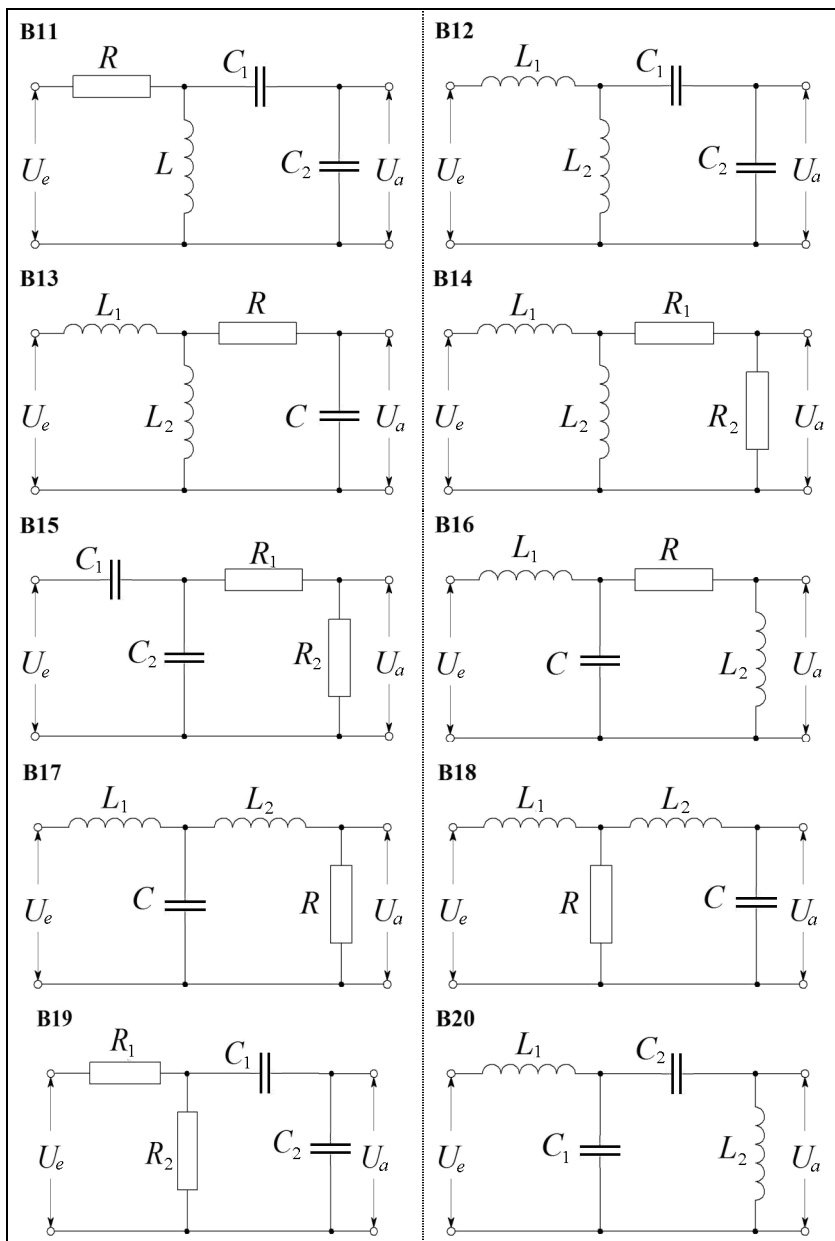
3.2.1. Построение физико-математических моделей и блок-схем преобразования сигналов измерительной информации; расчет характеристик измерительных преобразователей на основе блок-схем

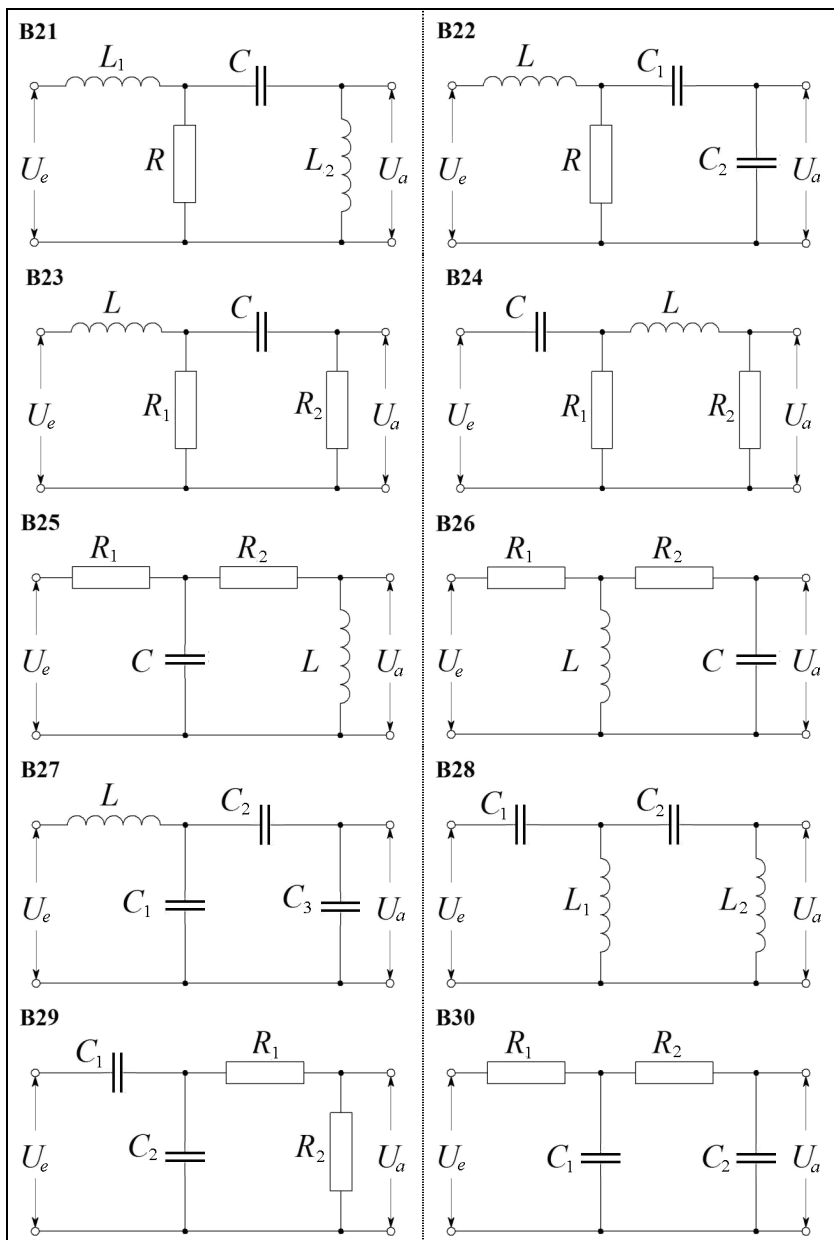
Постройте физико-математические модели и блок-схемы преобразования сигналов в измерительных преобразователях напряжения на основе цепей переменного тока, электрические схемы которых приведены в табл. 3.25 и 3.26 (соответственно задания **В** и **С**). На вход преобразователей подается входное напряжение U_e , которое преобразуется в выходное напряжение U_a . При построении блок-схем сигналов изображите измерительные преобразования на каждом из элементов электрической цепи. На основе блок-схем получите математические выражения для расчета передаточных функций $G(p)$ и комплексных коэффициентов передачи $G(i\omega)$ преобразователей.

При выполнении заданий **В** и **С** следует использовать методику, изложенную в примерах 8–10. Выражения для определения передаточных функций $G(p)$ выводятся в соответствии с формулой (3.23). Формулы для вычисления значений комплексных коэффициентов передачи $G(i\omega)$ преобразователей получаются из выражений $G(p)$ заменой: $p = i\omega$.

Электрические схемы преобразователей напряжения
на основе цепей переменного тока



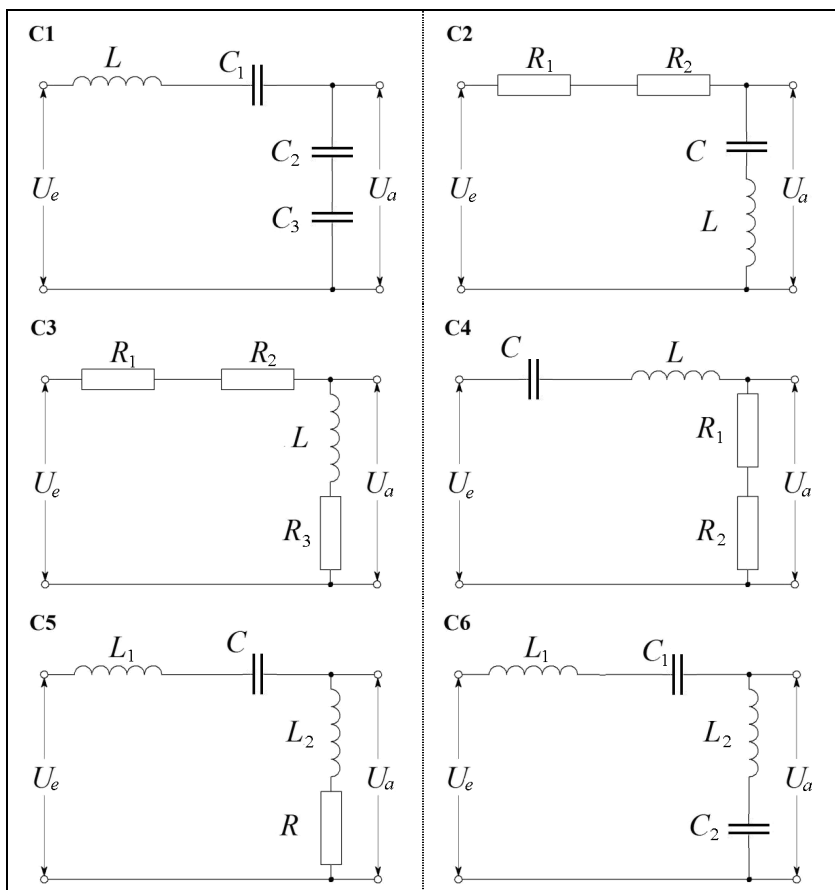


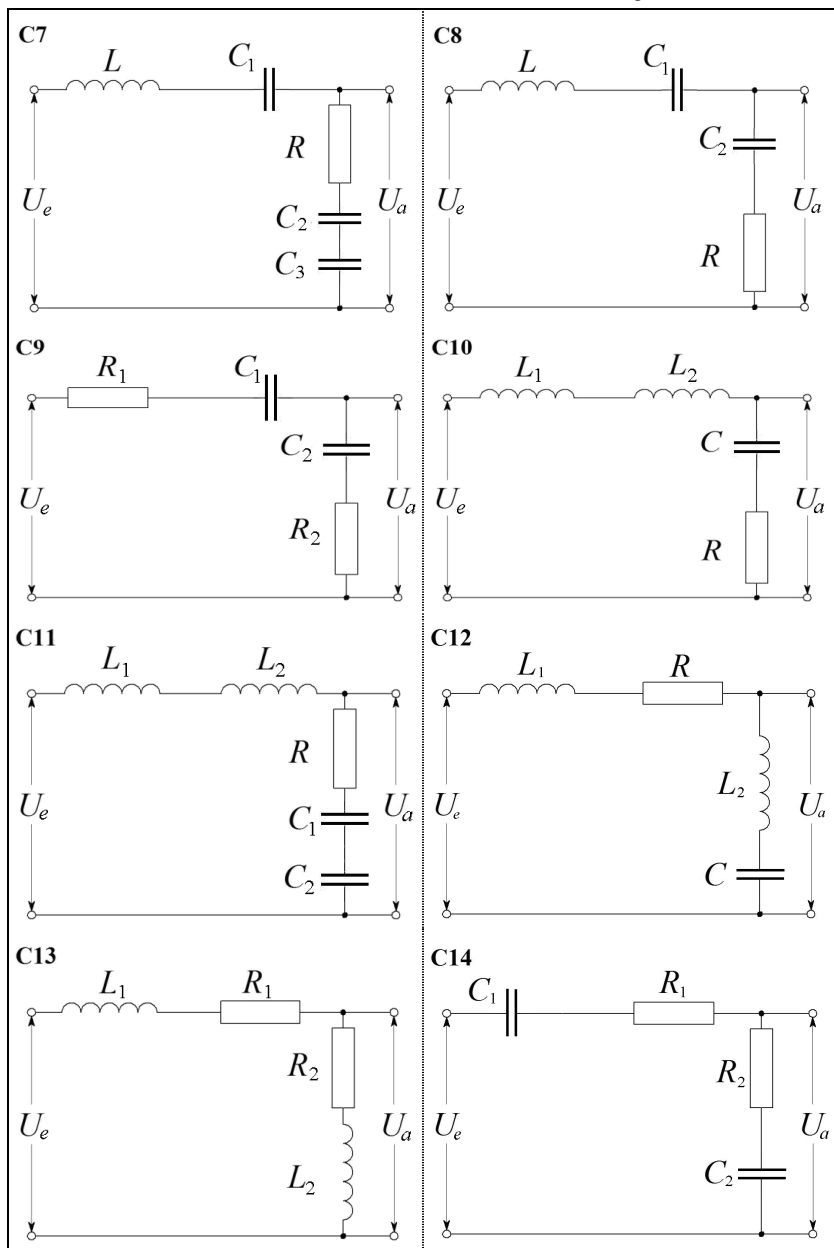


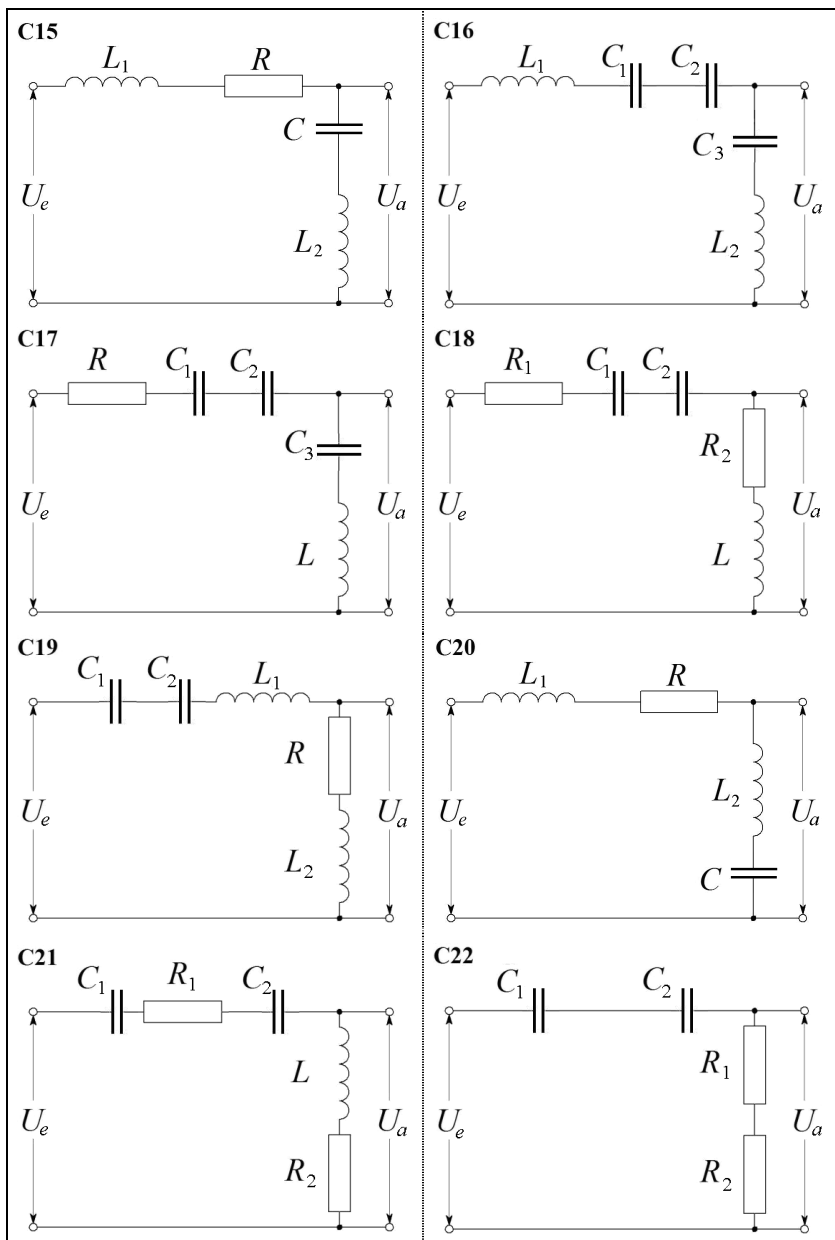
При построении физико-математических моделей преобразователей, электрические схемы которых приведены в табл. 3.26 (задания С), необходимо принять во внимание, что все элементы электрической цепи соединены последовательно. Входное напряжение U_e приложено ко всем элементам цепи; разветвлений электрического тока в цепи нет. При построении блок-схем преобразования сигналов требуется изобразить измерительные преобразования на каждом из элементов электрической цепи без предварительного преобразования цепи и замены ее на эквивалентную.

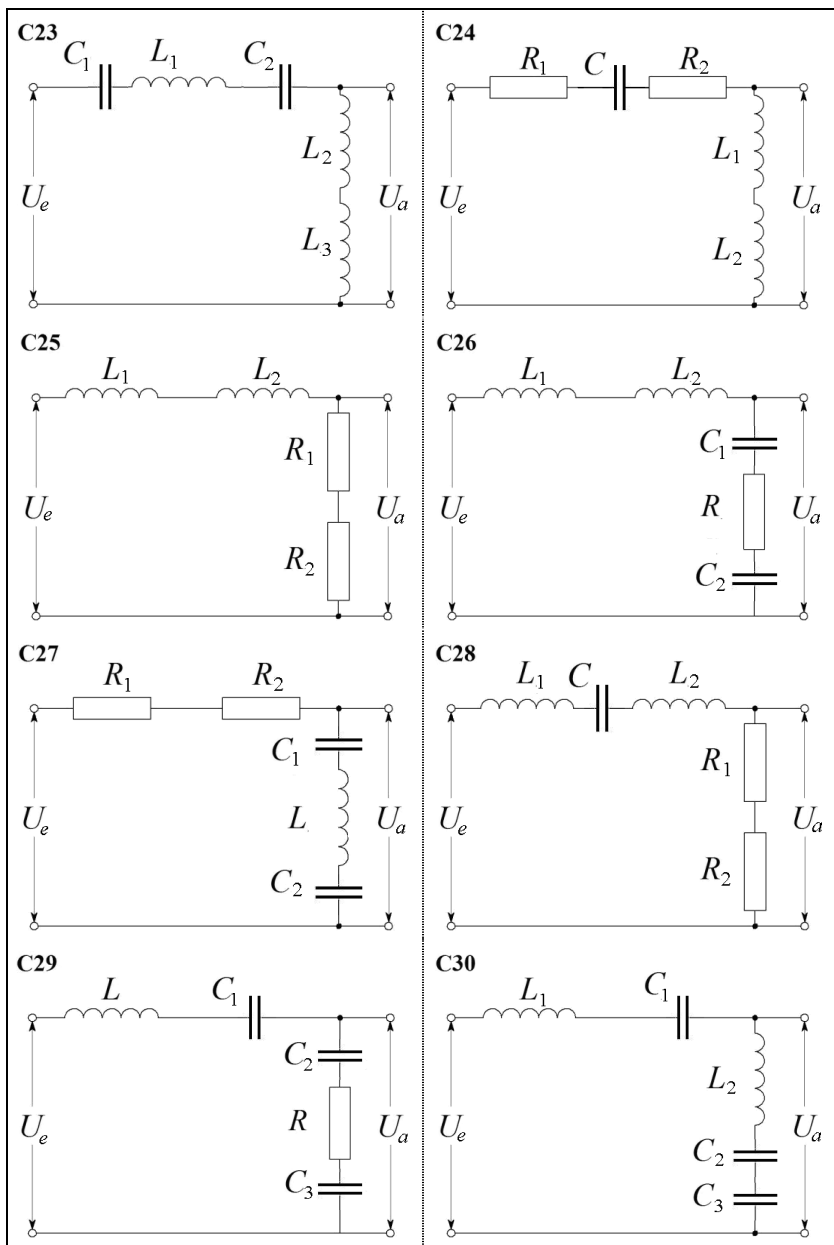
Таблица 3.26

Электрические схемы преобразователей напряжения
на основе цепей переменного тока









3.2.2. Определение характеристик оптических спектральных приборов

Основными характеристиками способности дисперсионных призм и дифракционных решеток к пространственному разделению спектральных линий с близкими значениями длин волн в оптических спектрах являются угловая дисперсия и разрешающая способность (см. подразд. 2.2.3 и 3.1.4, а также пример 12). При выполнении контрольного задания необходимо решить задачу, общее условие которой приведено ниже, и определить ряд параметров, характеризующих дифракционную решетку при ее использовании в качестве оптического спектрального прибора.

Задача

Имеется прозрачная дифракционная решетка. W – ширина ее заштрихованной области; d – период решетки; b – ширина каждой из ее прозрачных щелей; m – порядок спектра; D – угловая дисперсия решетки в спектре m -го порядка; R – ее разрешающая способность; m_{\max}^* – максимально возможный порядок спектра, в котором с применением решетки можно наблюдать достаточно интенсивную спектральную линию с длиной волны λ ; β – угол отклонения света, под которым наблюдается спектральная линия с длиной волны λ в спектре максимально возможного порядка; R_{\max}^* – максимальное значение разрешающей способности решетки для света с заданной длиной волны λ ; $\Delta\lambda_{\min}$ – минимальная разность длин волн соседних спектральных линий с длиной волны, близкой к значению λ , которые могут быть разрешены дифракционной решеткой в спектре максимально возможного порядка.

В соответствии с вариантом задания **D** определите значения неизвестных величин (табл. 3.27).

При выполнении задания сначала с применением формулы (3.55) рассчитайте в зависимости от условия задачи значение одной из неизвестных величин: периода дифракционной решетки d , ее угловой дисперсии D или длины световой волны λ при значении порядка спектра m , заданного в табл. 3.27.

Затем определите теоретическое значение максимально возможного порядка спектра m_{\max} и максимально возможный порядок спектра m_{\max}^* , в котором в эксперименте можно наблюдать достаточно интенсивную спектральную линию с длиной волны λ . Далее рассчитайте значение угла β , под которым наблюдается спектральная линия с длиной волны λ в спектре максимально возможного порядка m_{\max}^* , а также максимальное значение разрешающей способности R_{\max}^* . Проанализируйте полученные данные.

Таблица 3.27

Варианты задания по определению характеристик дифракционной решетки

Вариант	W , см	d , мкм	b , мкм	λ , нм	m	D , нм ⁻¹	m^*	β , град	R^*	$\Delta\lambda_{\min}$, нм
D1	2,70	4,5	1,2	540	3	?	?	?	?	?
D2	2,50	?	1,5	500	2	$4,08 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D3	2,34	3,6	1,1	680	2	?	?	?	?	?
D4	2,00	4,0	1,2	?	3	$8,59 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D5	2,73	?	1,0	440	3	$7,52 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D6	2,64	4,8	1,1	620	3	?	?	?	?	?
D7	2,75	5,5	1,5	?	2	$3,75 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D8	2,86	?	1,2	480	4	$8,28 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D9	2,66	3,8	1,2	520	2	?	?	?	?	?
D10	2,97	5,4	1,3	?	3	$5,89 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D11	2,40	3,7	1,1	?	3	$8,62 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D12	3,00	5,3	1,3	690	4	?	?	?	?	?
D13	2,56	4,1	1,5	?	2	$5,01 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D14	2,74	4,9	1,4	660	3	?	?	?	?	?
D15	1,88	3,5	1,5	430	2	?	?	?	?	?
D16	3,20	5,4	1,2	?	4	$8,49 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?

Вариант	W , см	d , мкм	b , мкм	λ , нм	m	D , нм ⁻¹	m^*	β , град	R_{\max}^*	$\Delta\lambda_{\min}$, нм
D17	2,65	?	1,1	450	3	$8,20 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D18	2,90	5,1	1,6	640	3	?	?	?	?	?
D19	2,85	?	1,4	475	2	$4,66 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D20	3,25	6,0	1,2	?	4	$7,54 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D21	2,40	?	1,2	460	3	$8,47 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D22	3,00	5,8	1,1	625	4	?	?	?	?	?
D23	2,56	3,2	0,9	?	2	$6,59 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D24	2,74	?	1,3	580	3	$5,64 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D25	2,88	4,6	1,1	575	3	?	?	?	?	?
D26	1,98	3,2	1,0	?	2	$6,48 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D27	3,12	3,5	1,1	445	3	?	?	?	?	?
D28	3,40	4,6	1,5	520	3	?	?	?	?	?
D29	2,45	?	1,2	680	2	$5,32 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D30	2,95	5,3	1,6	?	2	$3,91 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D31	3,42	4,2	1,4	590	3	?	?	?	?	?
D32	3,52	4,3	1,2	?	2	$4,86 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?

3.2.3. Моделирование распределений интенсивности спектральных линий характеристического рентгеновского излучения

При подготовке к выполнению задания изучите подразд. 2.4.5.

Постройте распределение по длинам волн интенсивности рентгеновских спектральных линий K_{α} -излучения атомов элемента, соответствующего номеру задания **Е** (табл. 3.28). Максимальное значение интенсивности $K_{\alpha 1}$ -линии примите равным единице ($I_{\text{max}} = 1$ отн. ед.); значение стандартного отклонения $\sigma = 0,0015 \text{ \AA}$; отношение максимальных значений интенсивностей спектральных линий $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ равным 2 : 1.

Расчеты по заданию и оформление результатов проведите в соответствии с методикой, изложенной в примерах 13, 14 подразд. 3.1.5. Проанализируйте полученные данные.

Таблица 3.28

Варианты задания по моделированию распределений интенсивности рентгеновских спектральных линий K_{α} -излучения атомов элементов

Задание	Элемент	Задание	Элемент	Задание	Элемент
Е1	Si	Е16	Nb	Е31	Hf
Е2	K	Е17	Mo	Е32	W
Е3	Ca	Е18	Ru	Е33	Os
Е4	Sc	Е19	Rh	Е34	Cu
Е5	Ti	Е20	Pd	Е35	Zn
Е6	V	Е21	Ag	Е36	Ga
Е7	Cr	Е22	Cd	Е37	Ge
Е8	Mn	Е23	Ce	Е38	In
Е9	Fe	Е24	Nd	Е39	Sn
Е10	Co	Е25	Gd	Е40	Ba
Е11	Ni	Е26	Tb	Е41	La
Е12	Rb	Е27	Dy	Е42	Ir
Е13	Sr	Е28	Ho	Е43	Au
Е14	Y	Е29	Er	Е44	Pb
Е15	Zr	Е30	Yb	Е45	Bi

3.2.4. Определение элементного состава поверхности образцов по фотоэлектронным спектрам

На рис. 3.25–3.57 приведены обзорные фотоэлектронные спектры, снятые при исследовании различных веществ. При выполнении каждого из заданий **Е** требуется определить элементный состав анализируемого слоя исследуемого вещества, а также оценить относительное содержание атомов элементов в этом слое.

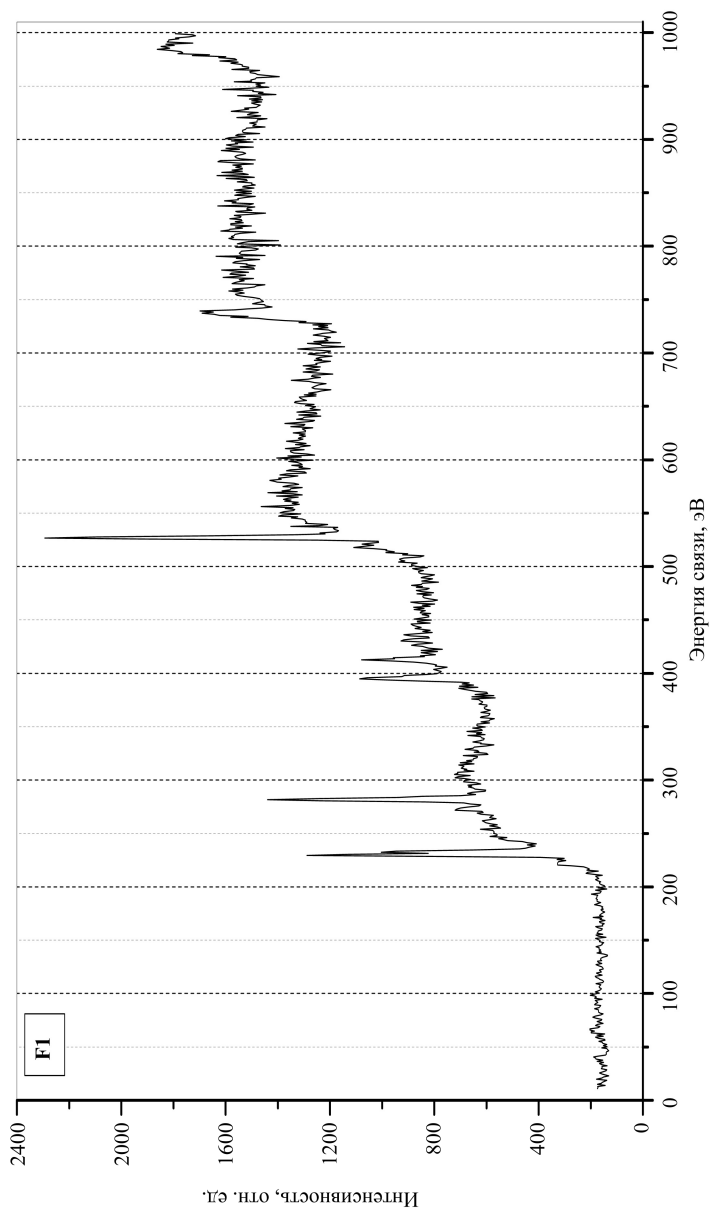


Рис. 3.25. Фотоэлектронный спектр к заданию F1

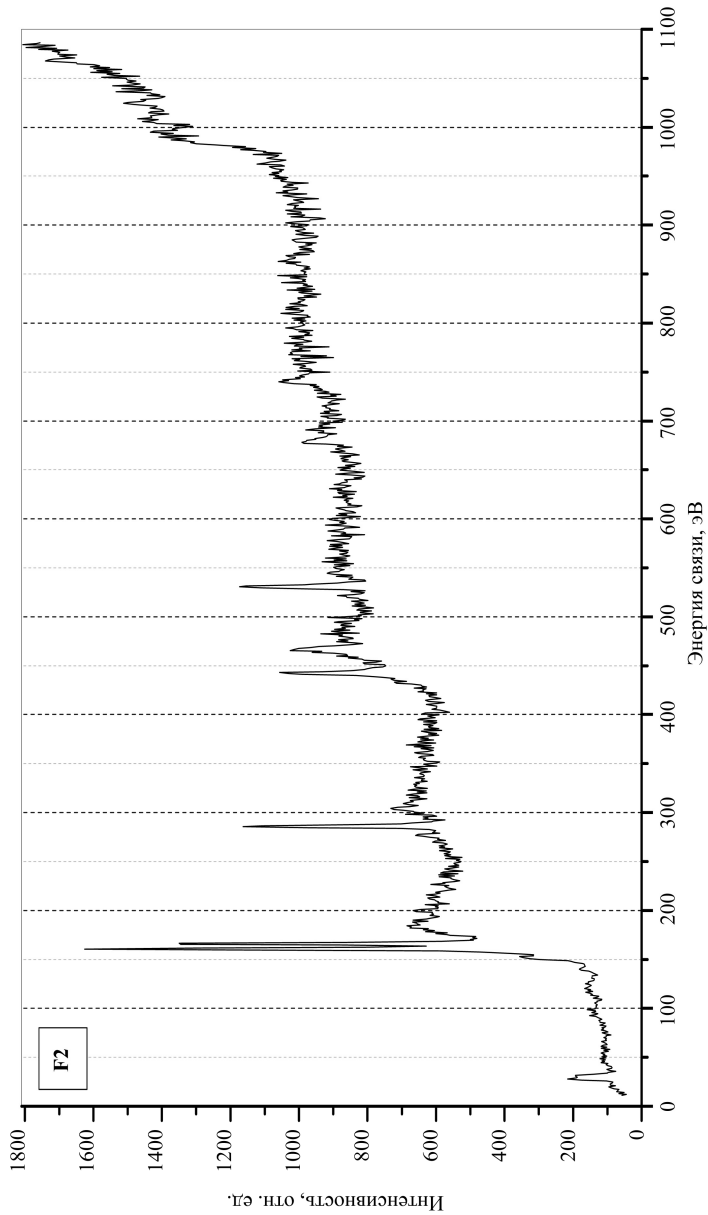


Рис. 3.26. Фотоэлектронный спектр к заданию F2

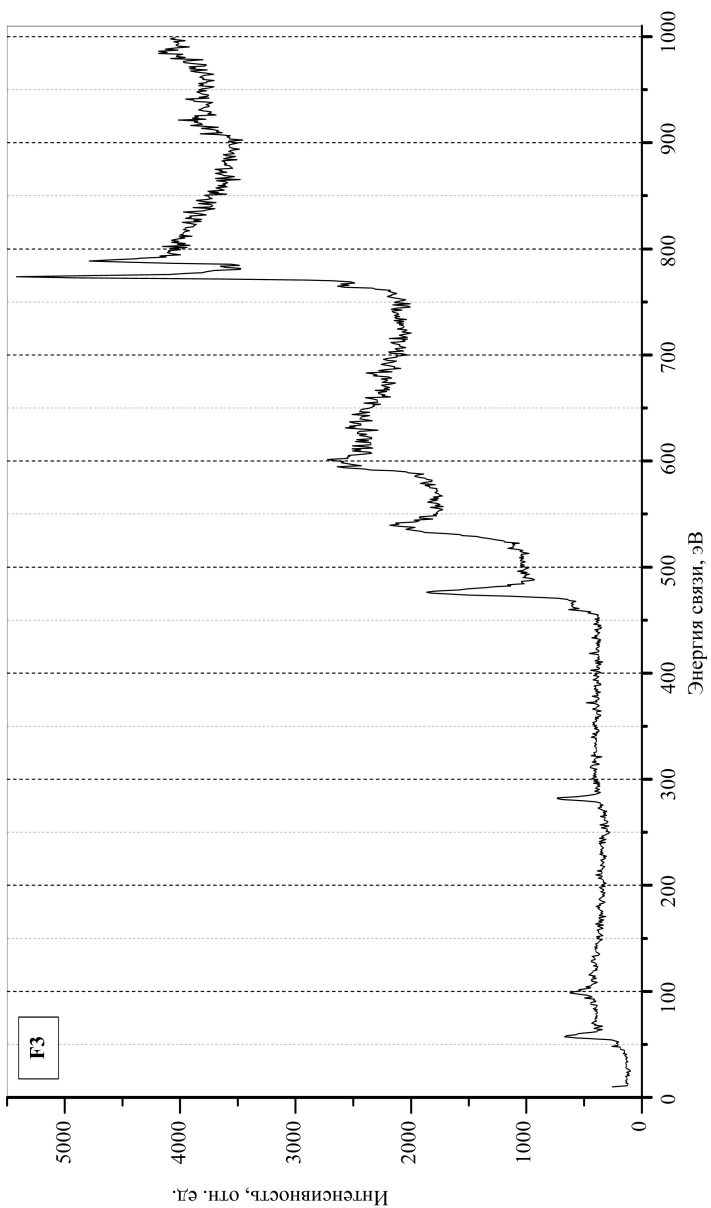


Рис. 3.27. Фотоэлектронный спектр к заданию F3

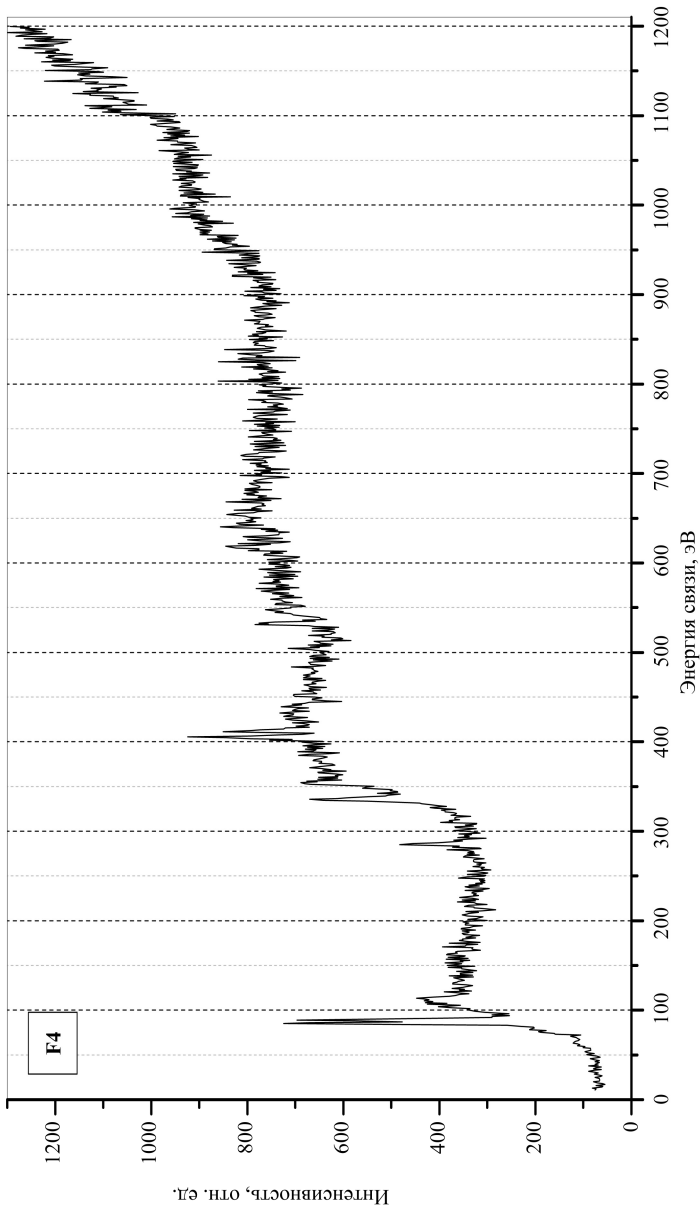


Рис. 3.28. Фотоэлектронный спектр к заданию F4

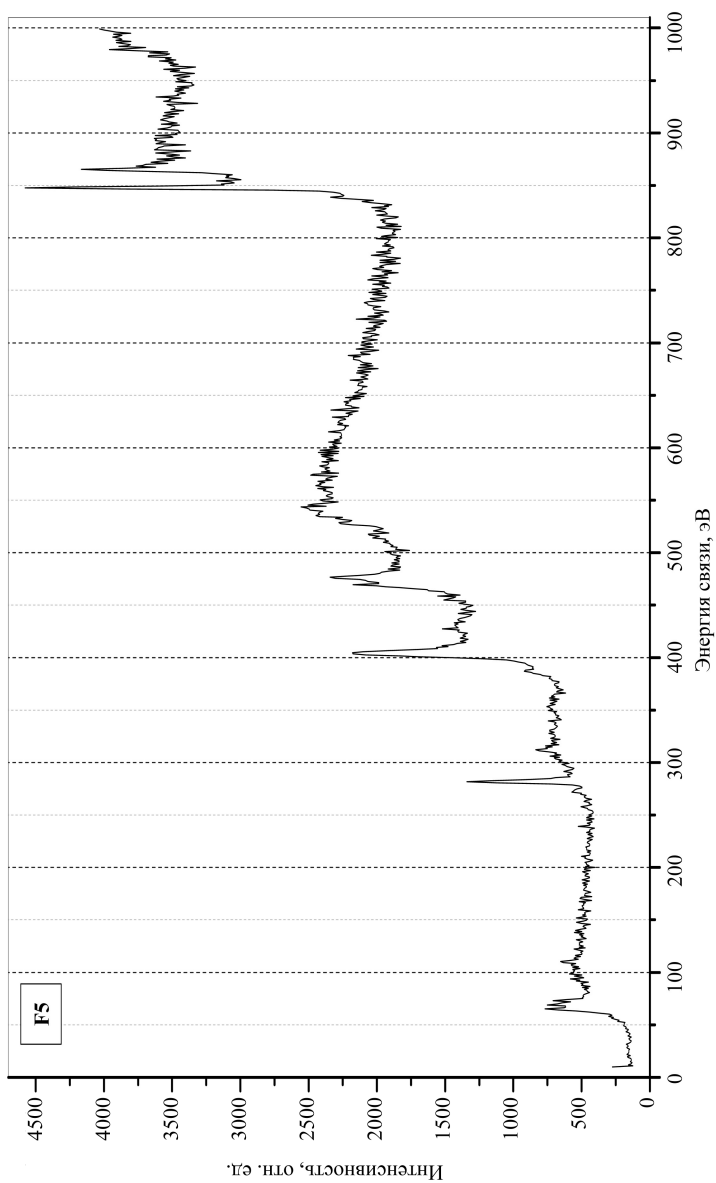


Рис. 3.29. Фотоэлектронный спектр к заданию F5

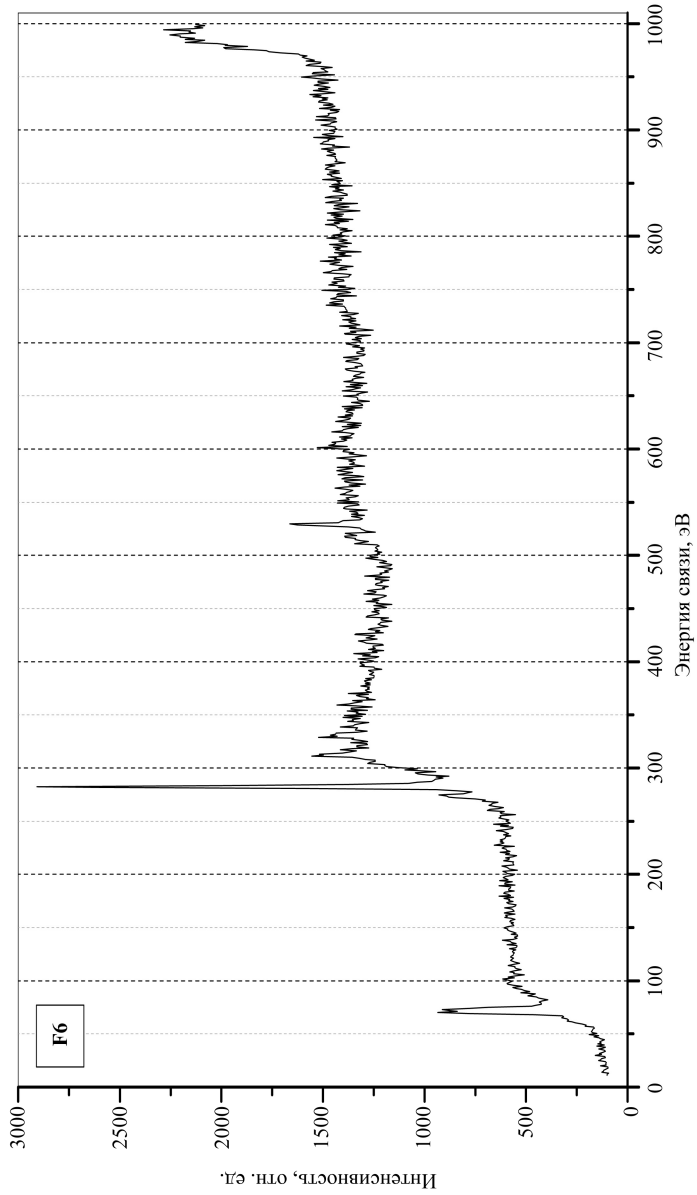


Рис. 3.30. Фотоэлектронный спектр к заданию F6

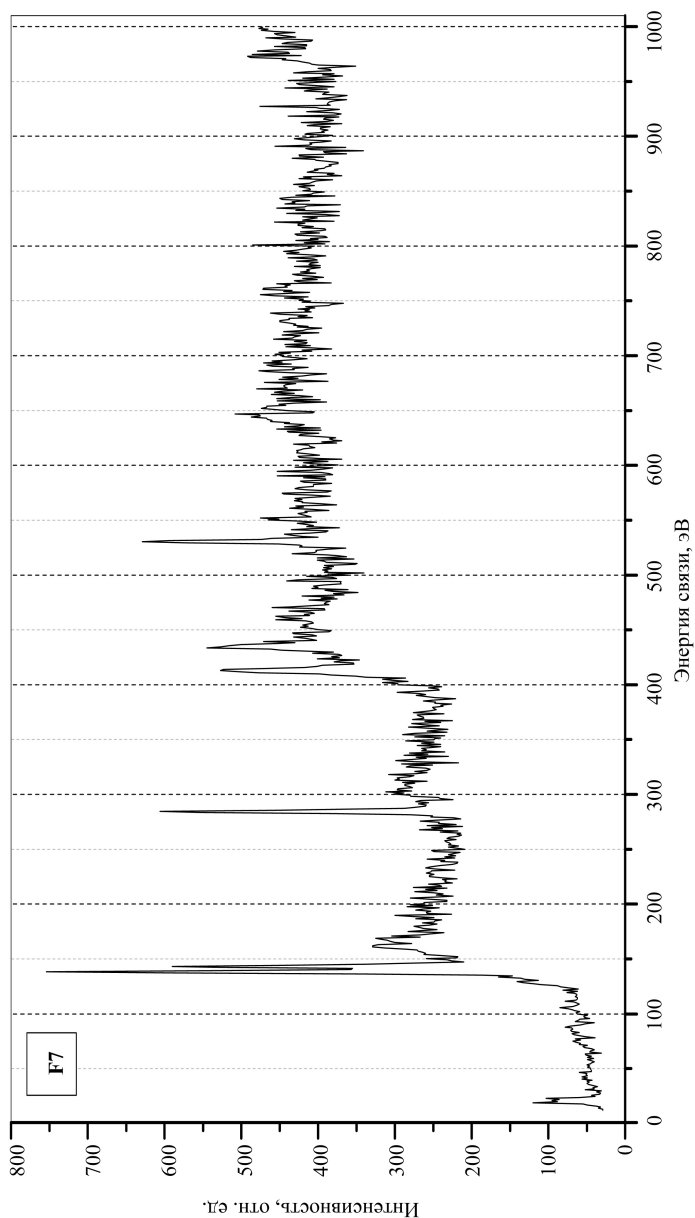


Рис. 3.31. Фотоэлектронный спектр к заданию F7

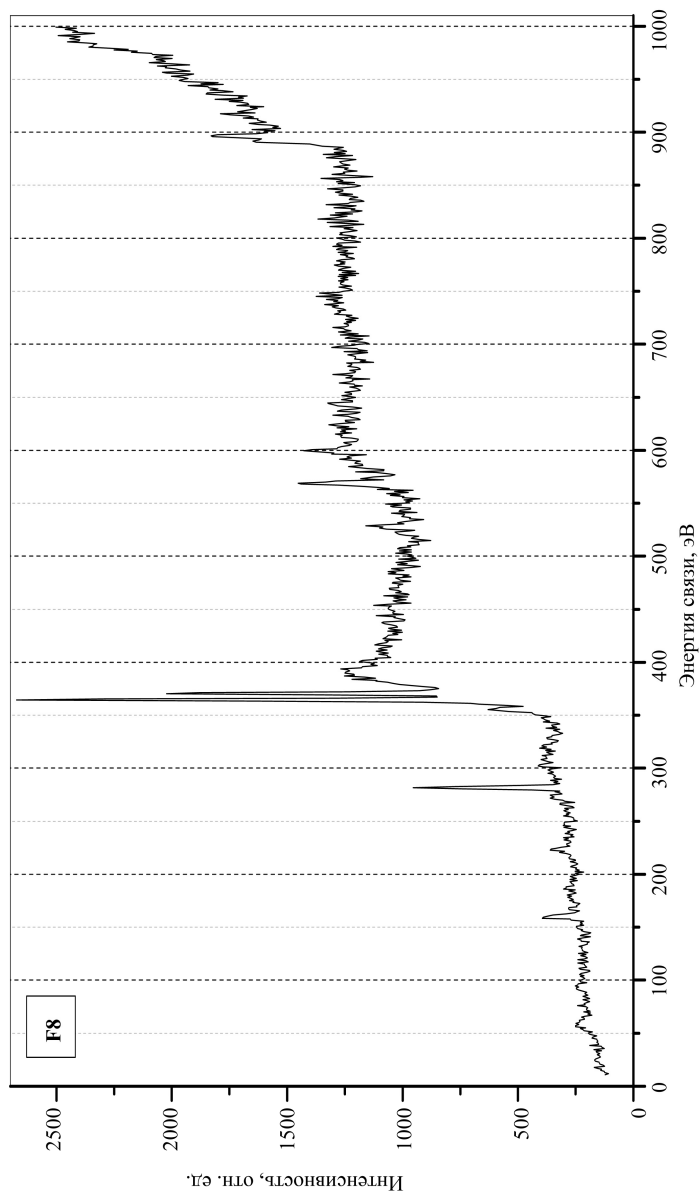


Рис. 3.32. Фотоэлектронный спектр к заданию F8

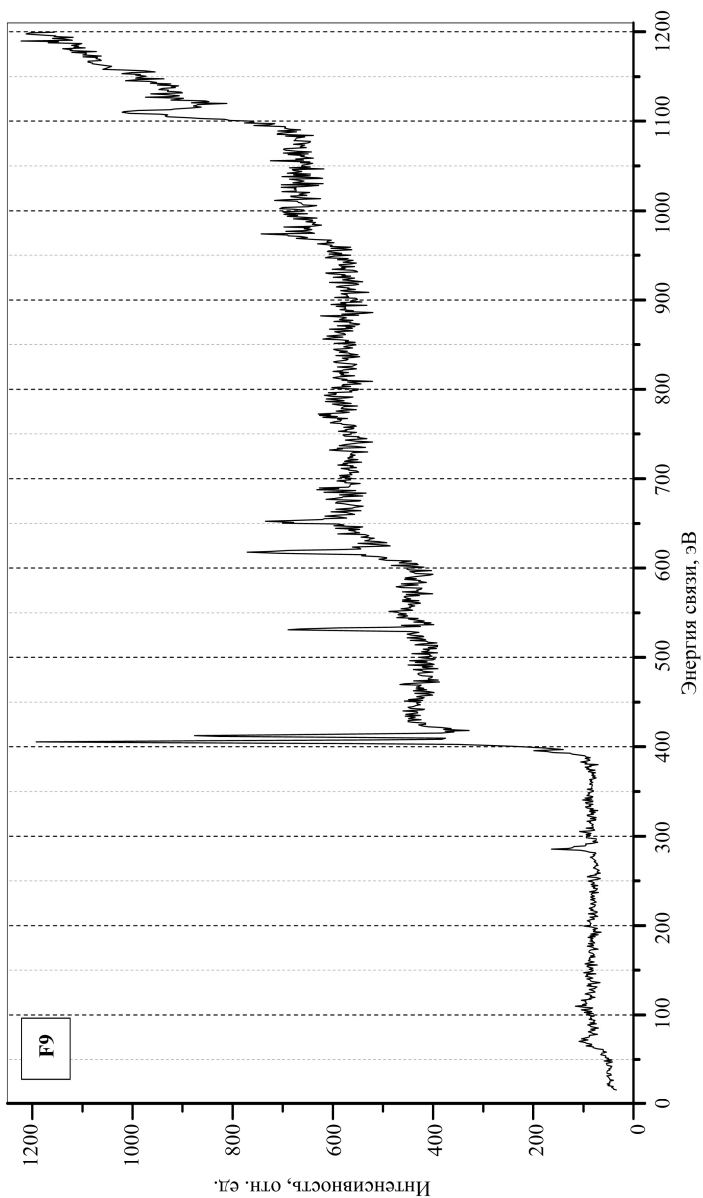


Рис. 3.33. Фотоэлектронный спектр к заданию F9

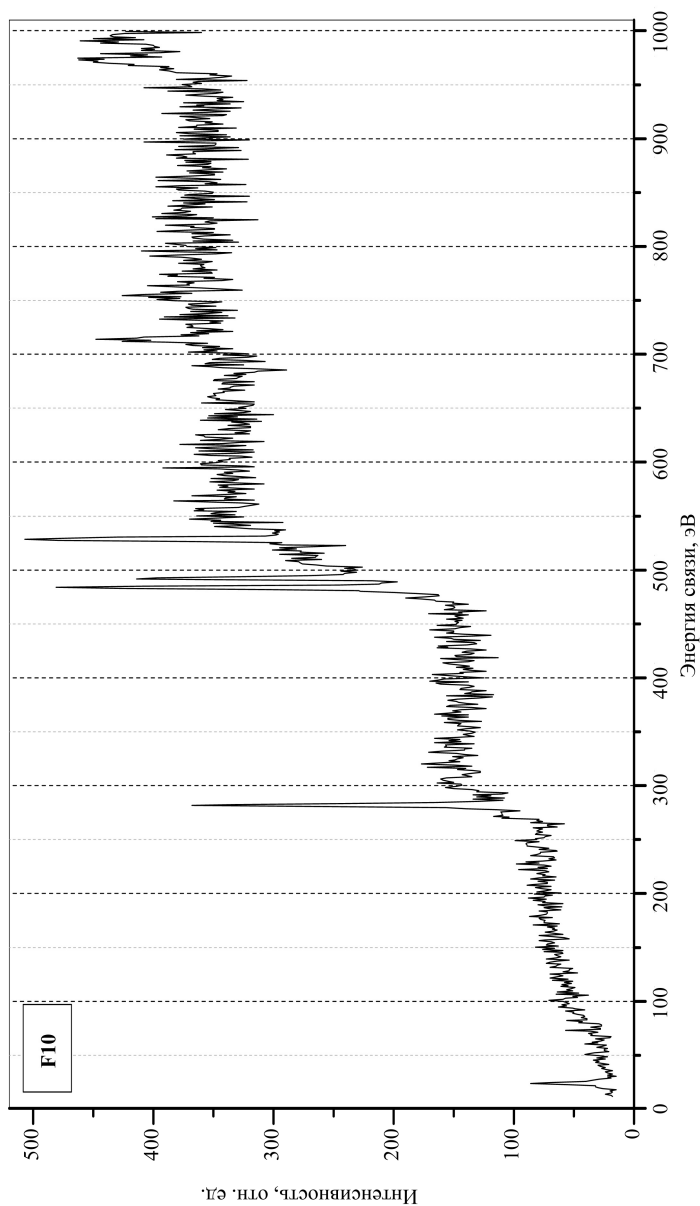


Рис. 3.34. Фотоэлектронный спектр к заданию F10

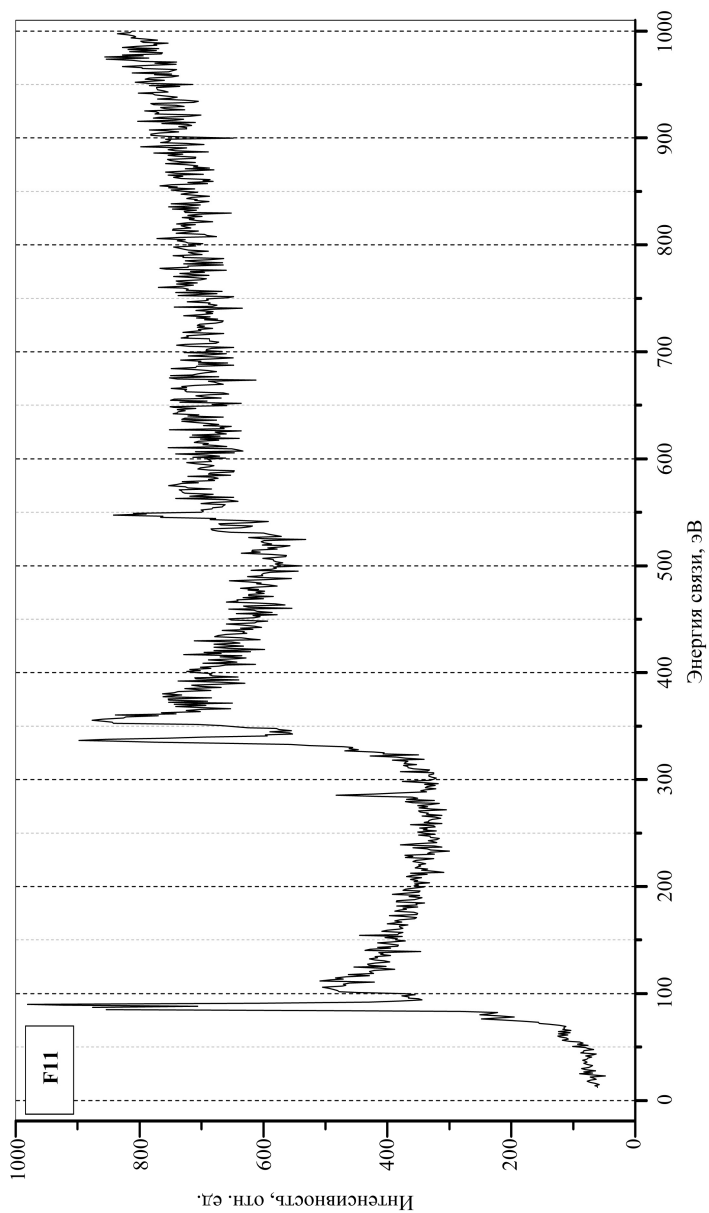


Рис. 3.35. Фотоэлектронный спектр к заданию F11

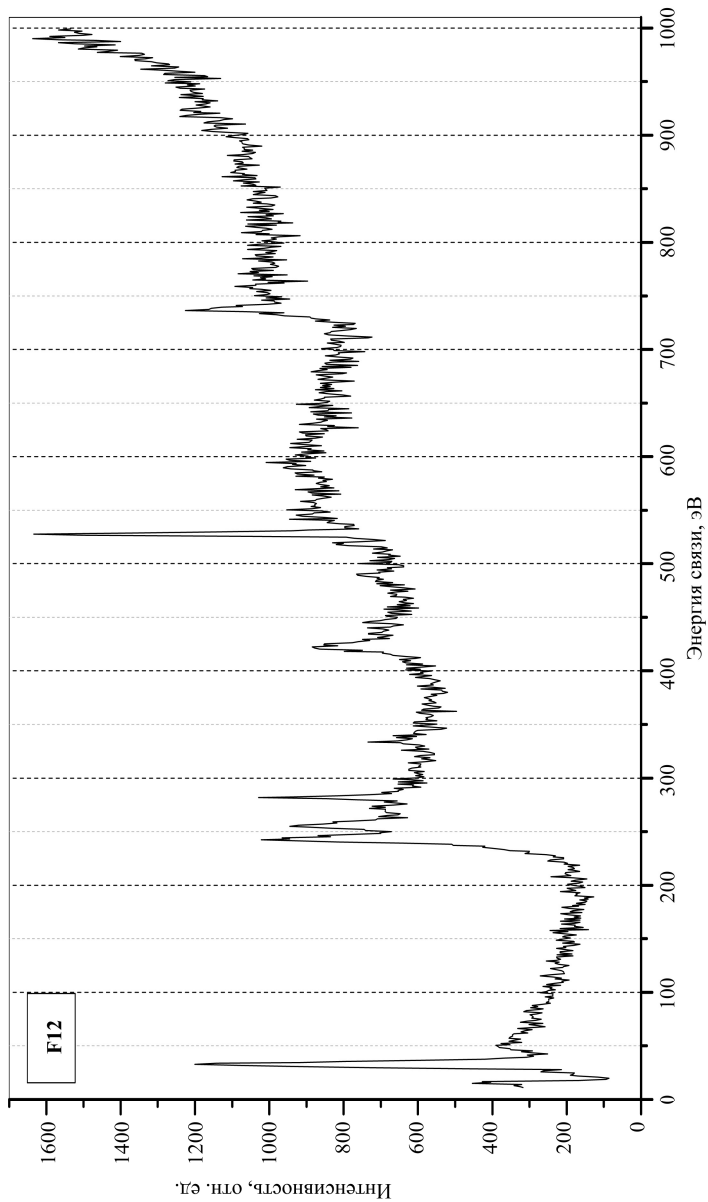


Рис. 3.36. Фотоэлектронный спектр к заданию **F12**

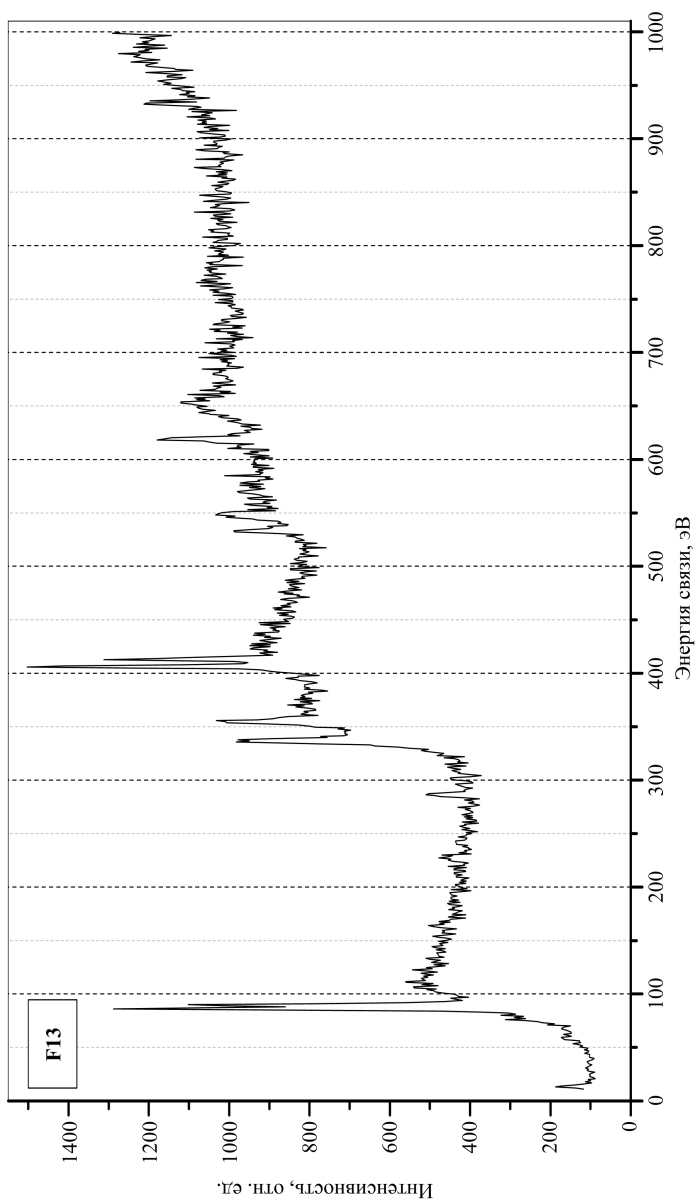


Рис. 3.37. Фотоэлектронный спектр к заданию F13

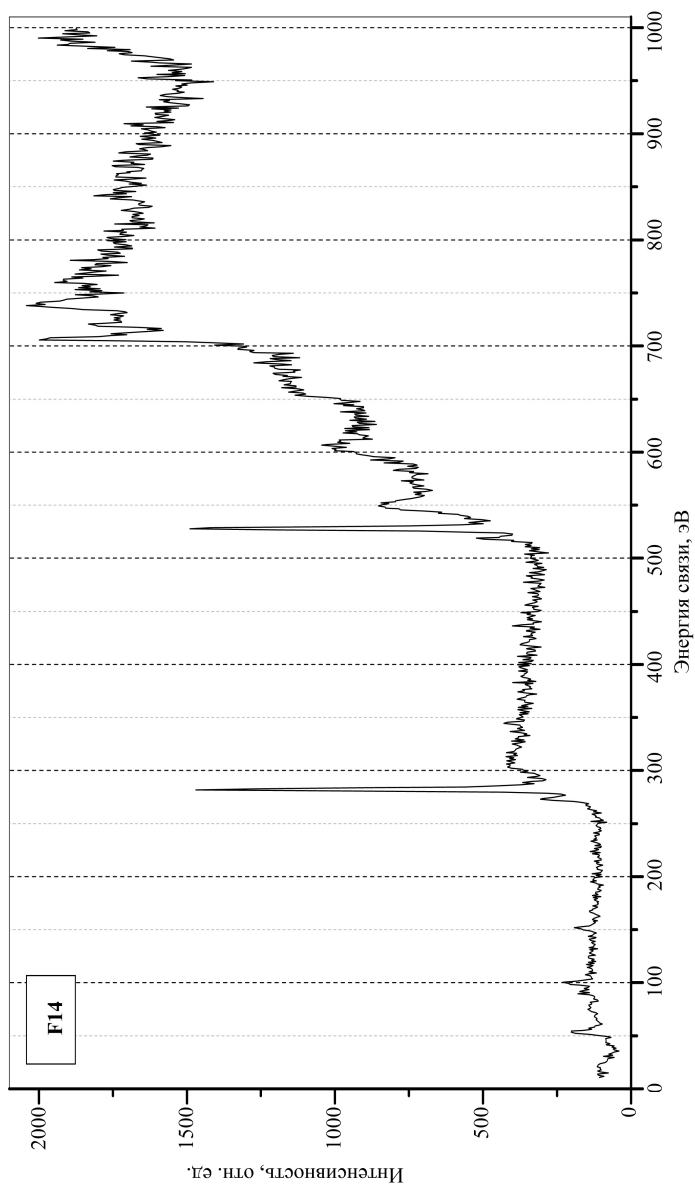


Рис. 3.38. Фотоэлектронный спектр к заданию F14

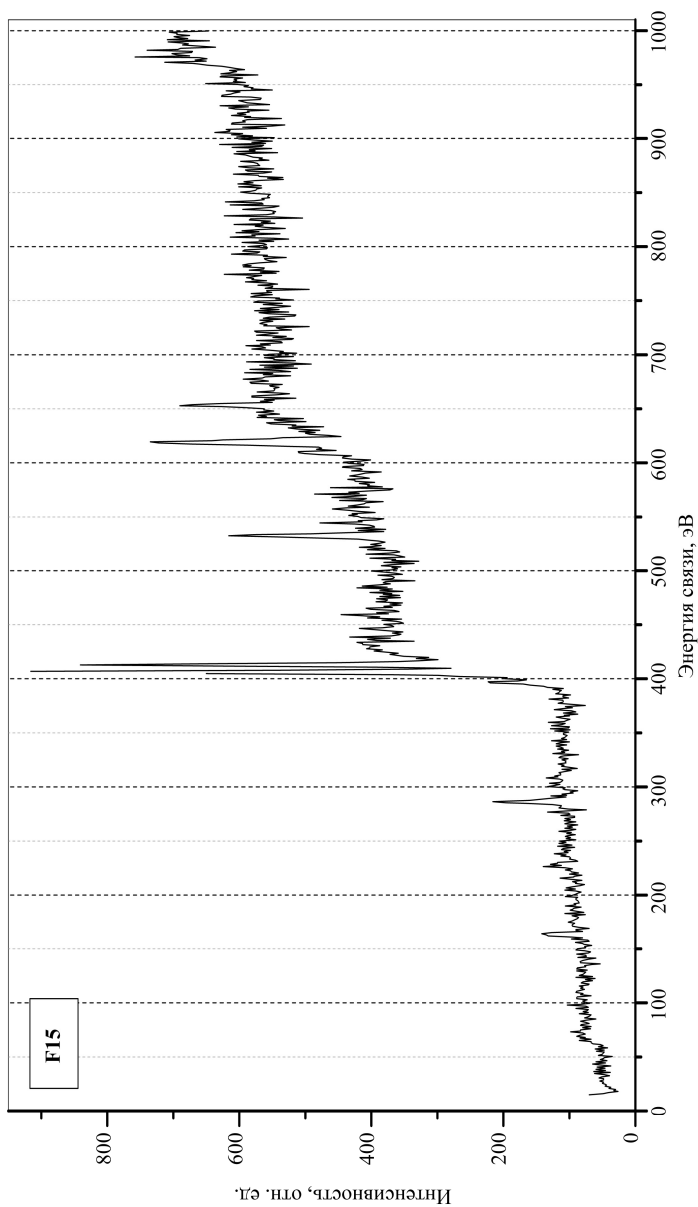


Рис. 3.39. Фотоэлектронный спектр к заданию F15

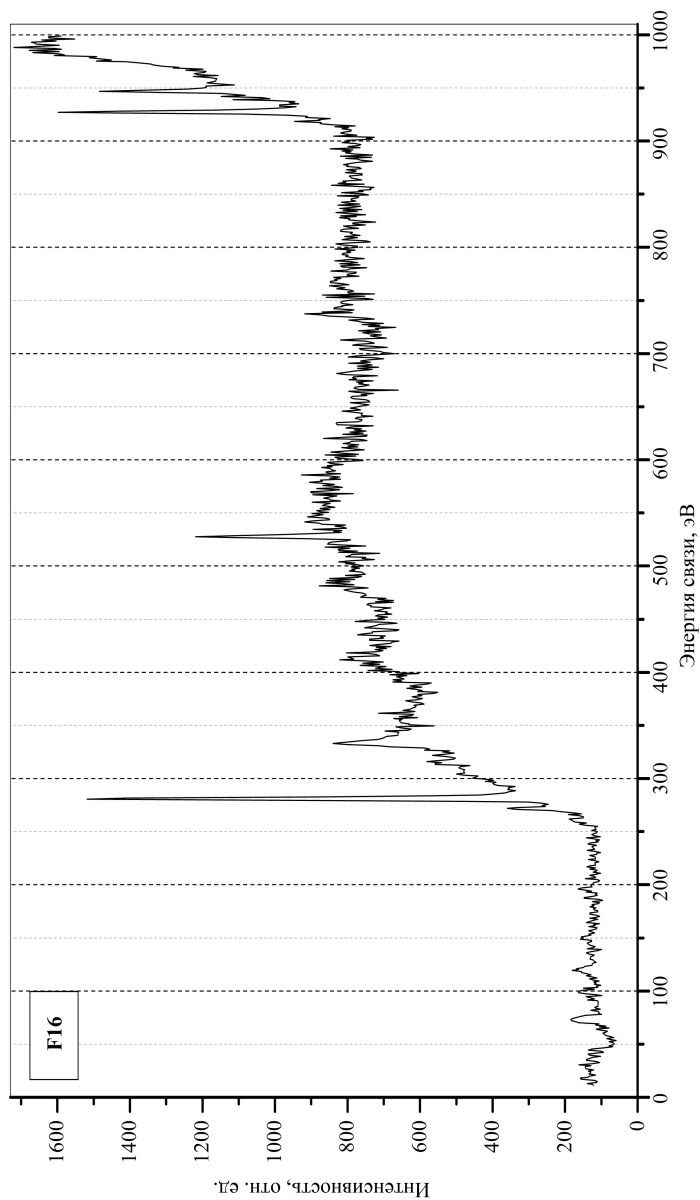


Рис. 3.40. Фотоэлектронный спектр к заданию F16

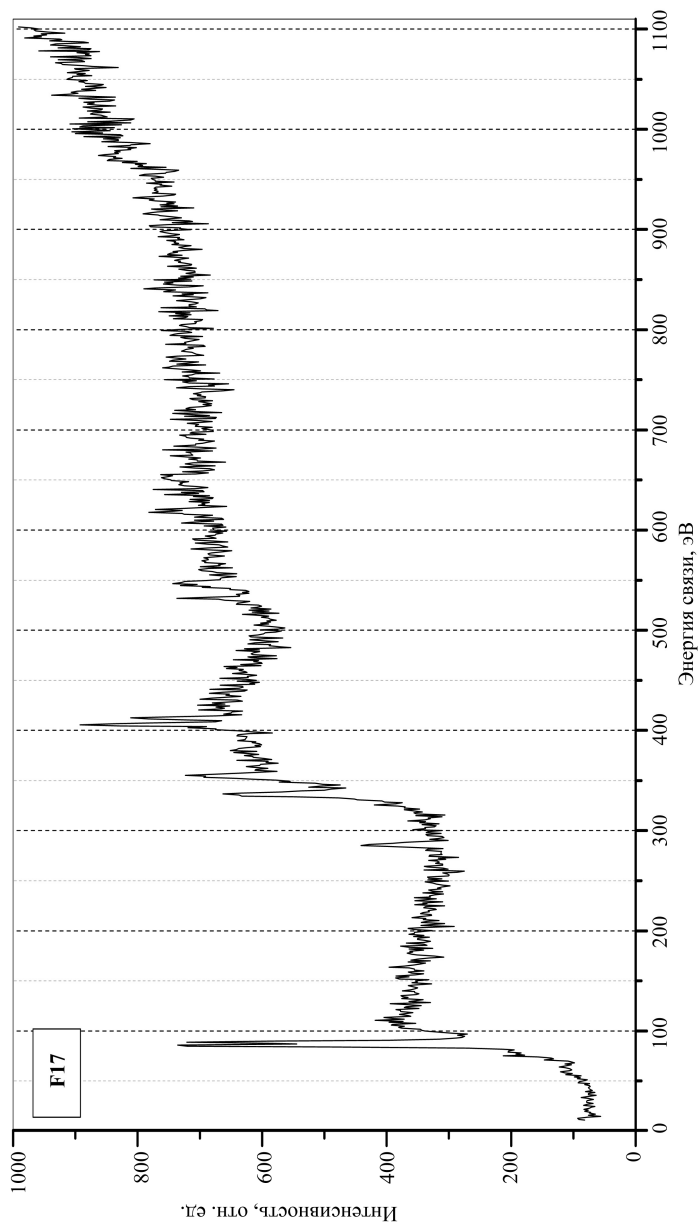


Рис. 3.41. Фотоэлектронный спектр к заданию F17

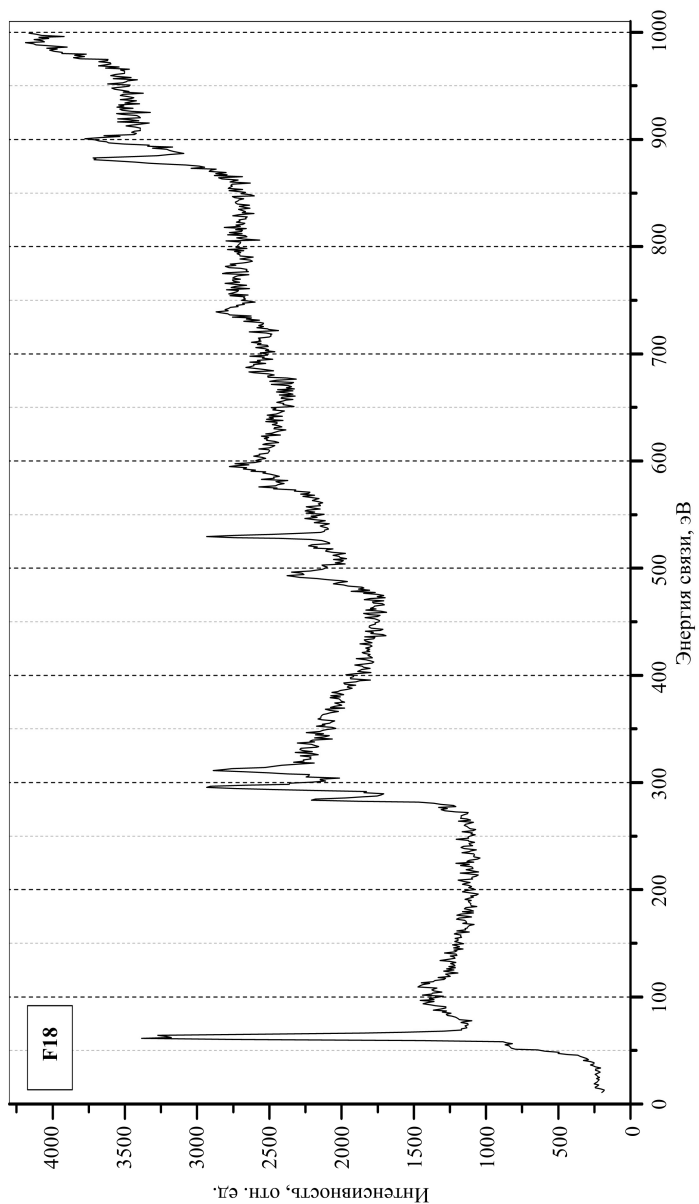


Рис. 3.42. Фотоэлектронный спектр к заданию F18

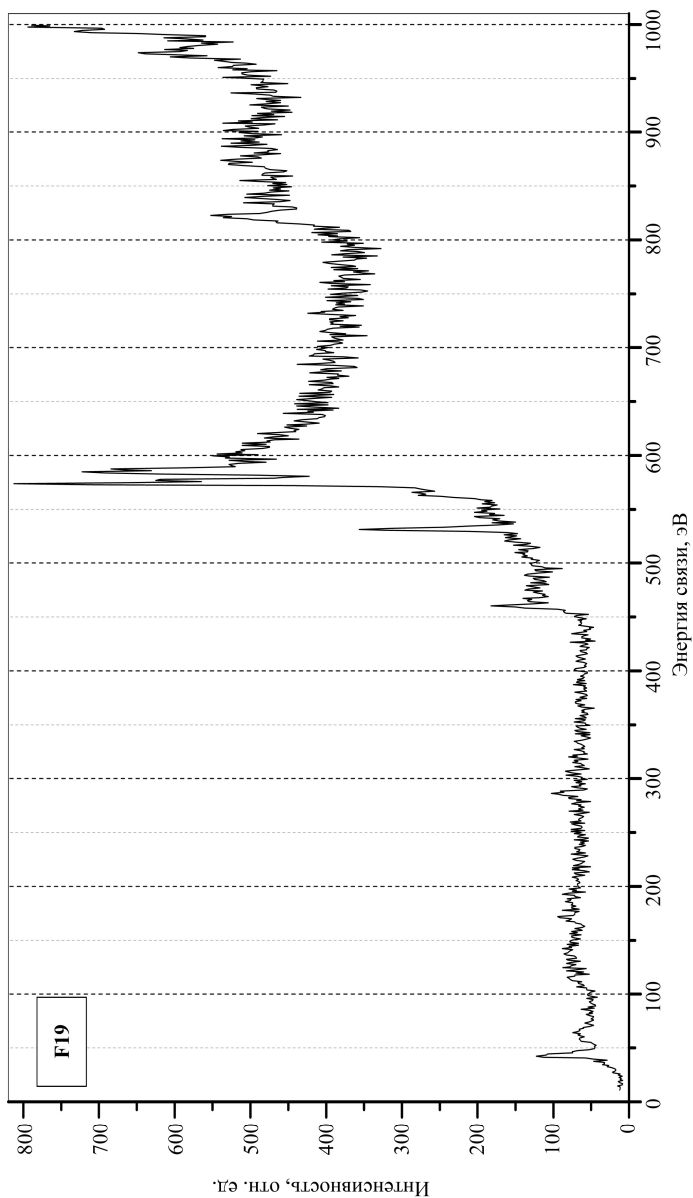


Рис. 3.43. Фотоэлектронный спектр к заданию F19

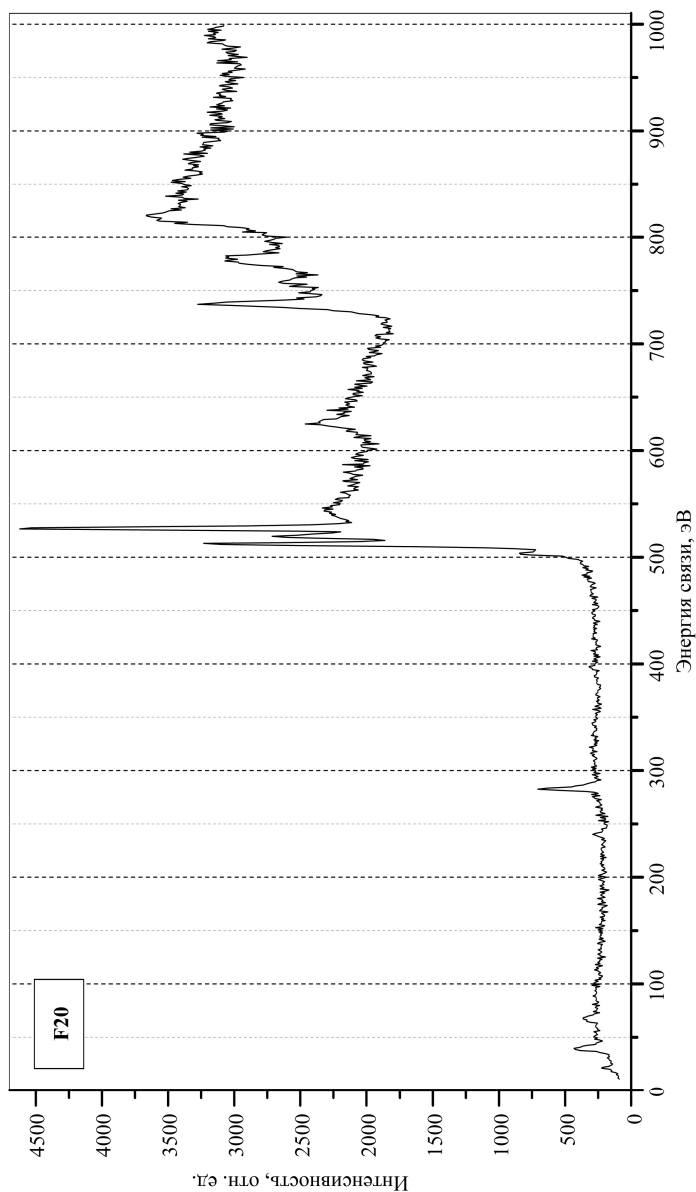


Рис. 3.44. Фотоэлектронный спектр к заданию F20

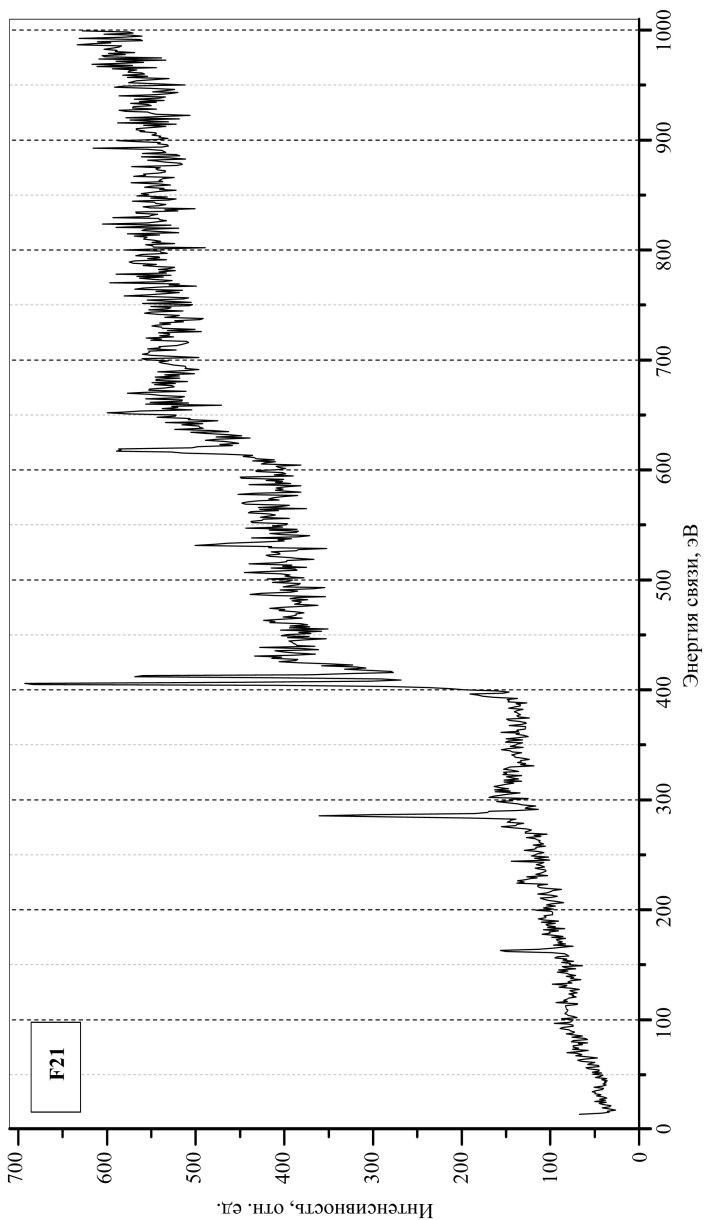


Рис. 3.45. Фотоэлектронный спектр к заданию F21

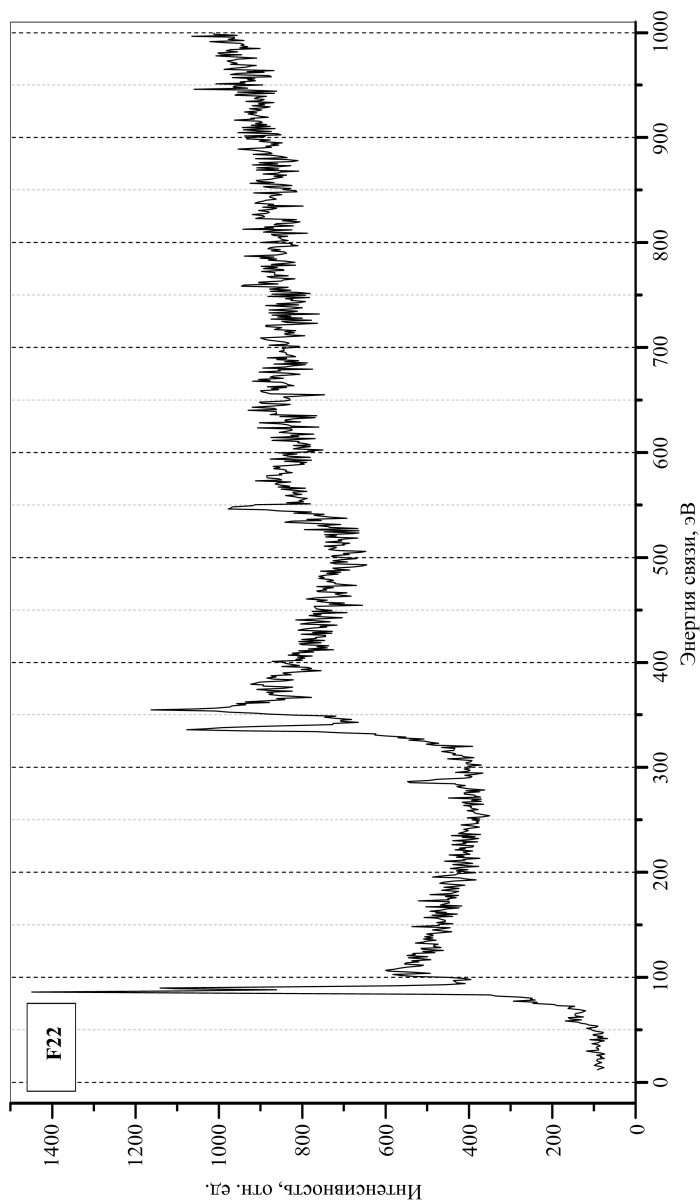


Рис. 3.46. Фотоэлектронный спектр к заданию F22

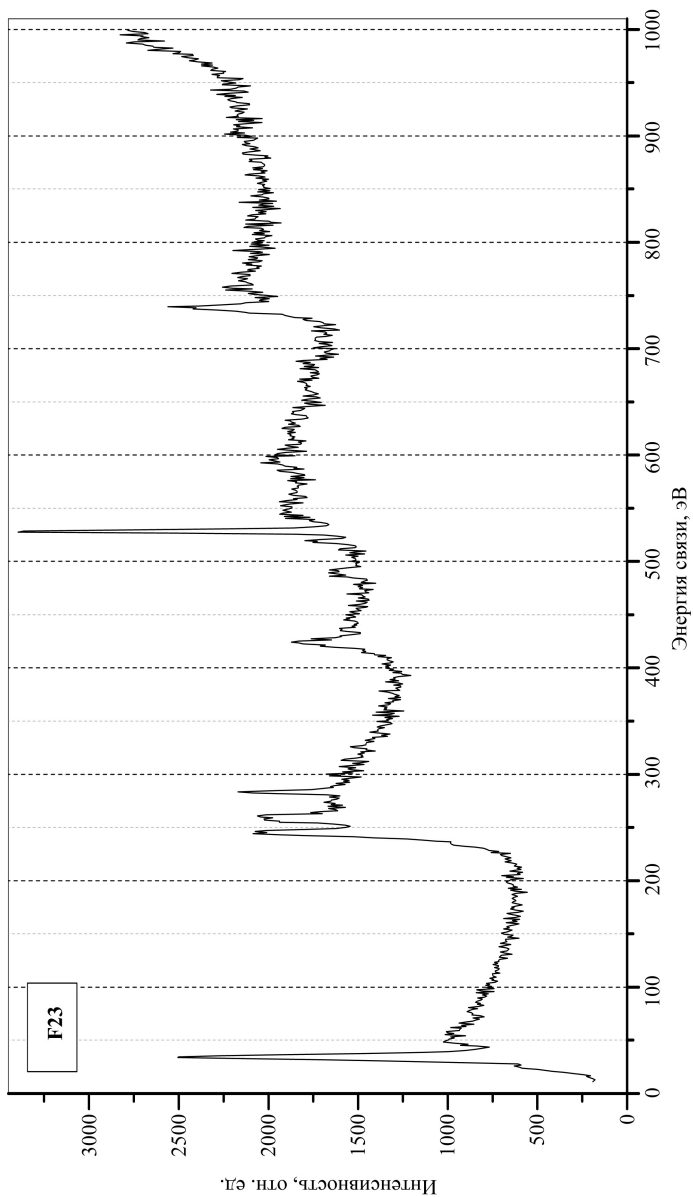


Рис. 3.47. Фотоэлектронный спектр к заданию F23

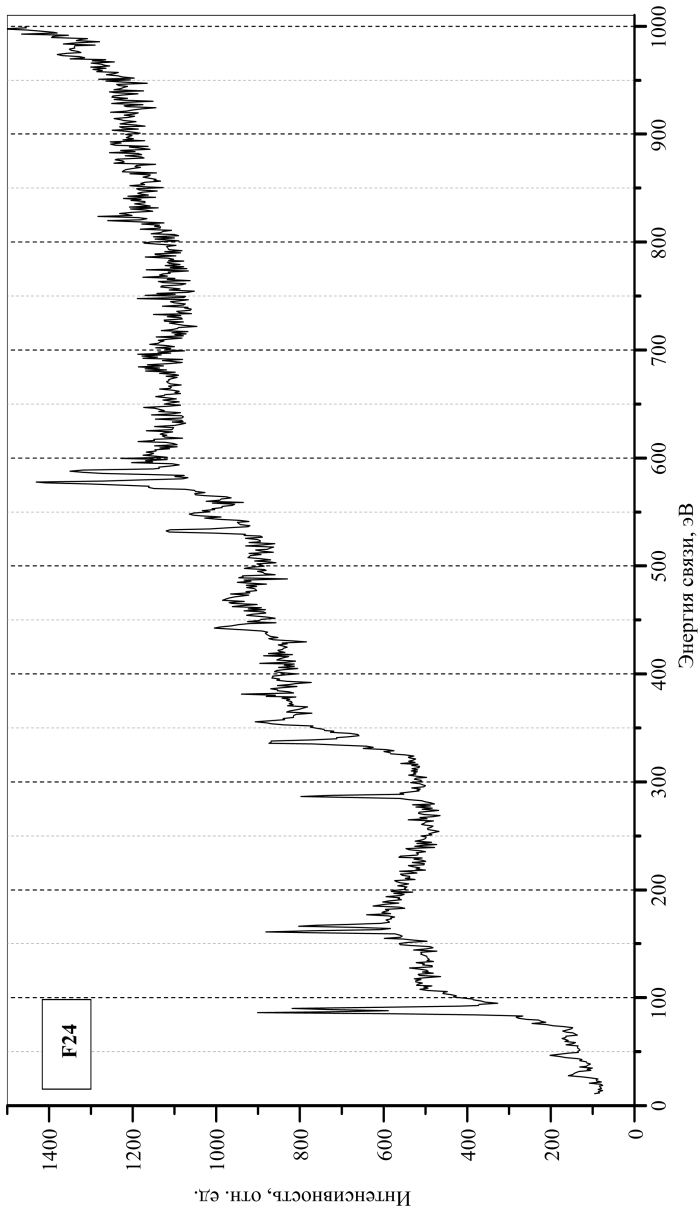
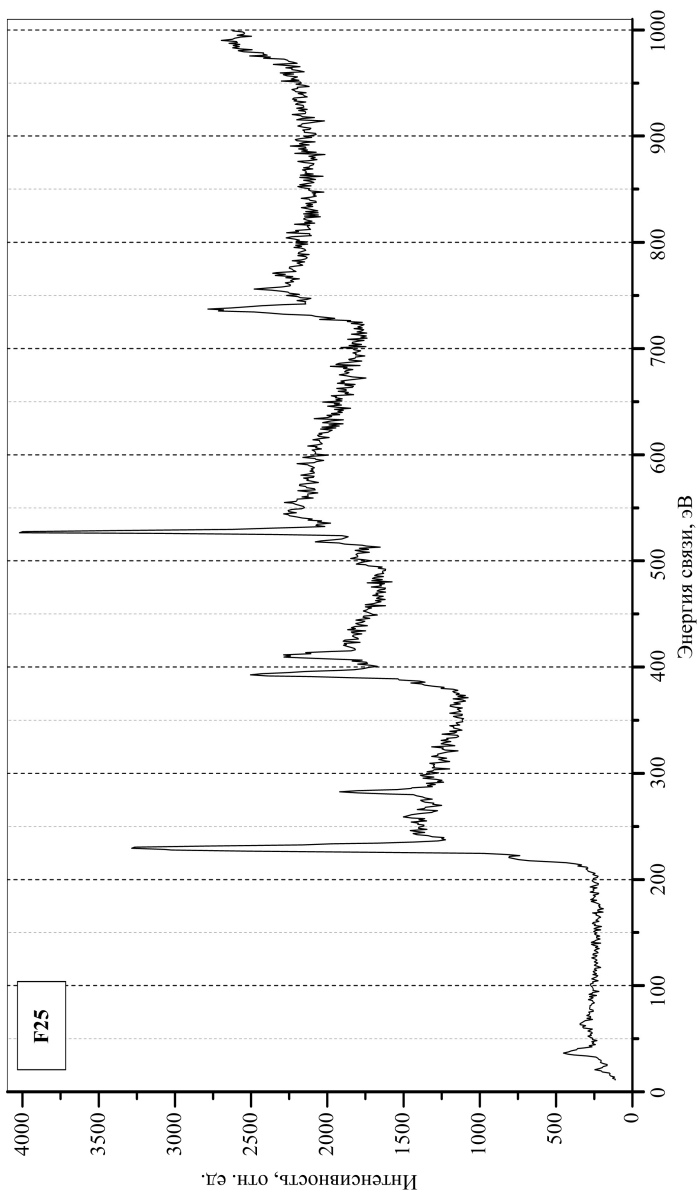


Рис. 3.48. Фотоэлектронный спектр к заданию F24

Рис. 3.49. Фотоэлектронный спектр к заданию **F25**

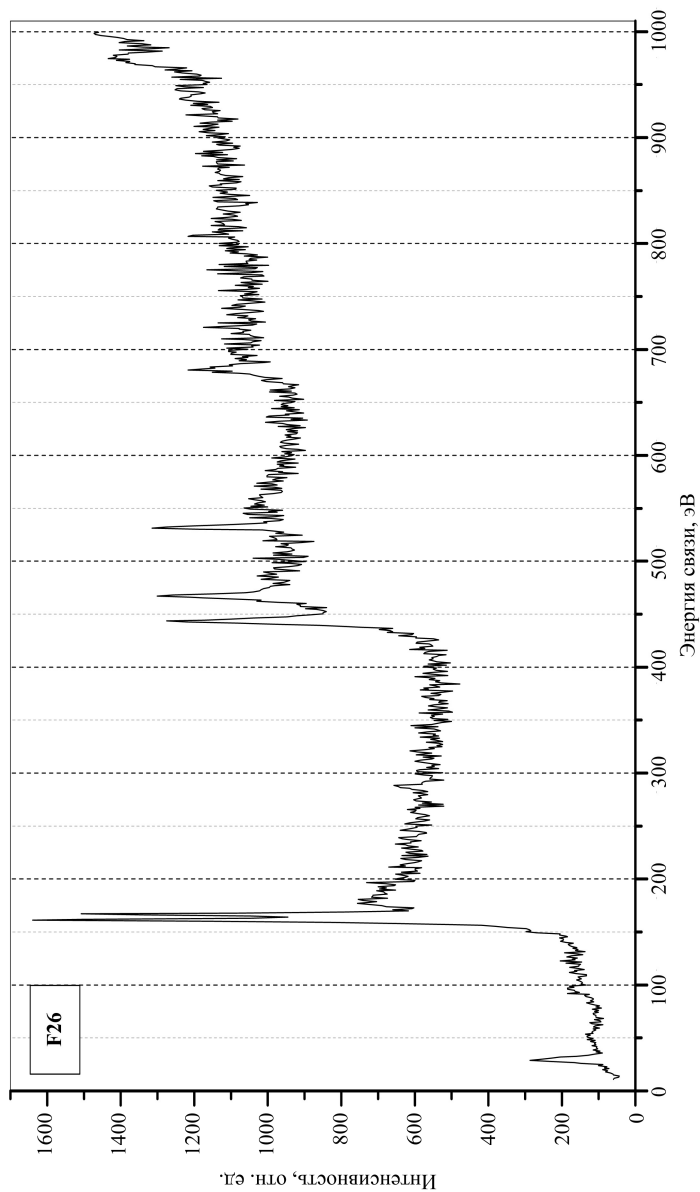


Рис. 3.50. Фотоэлектронный спектр к заданию F26

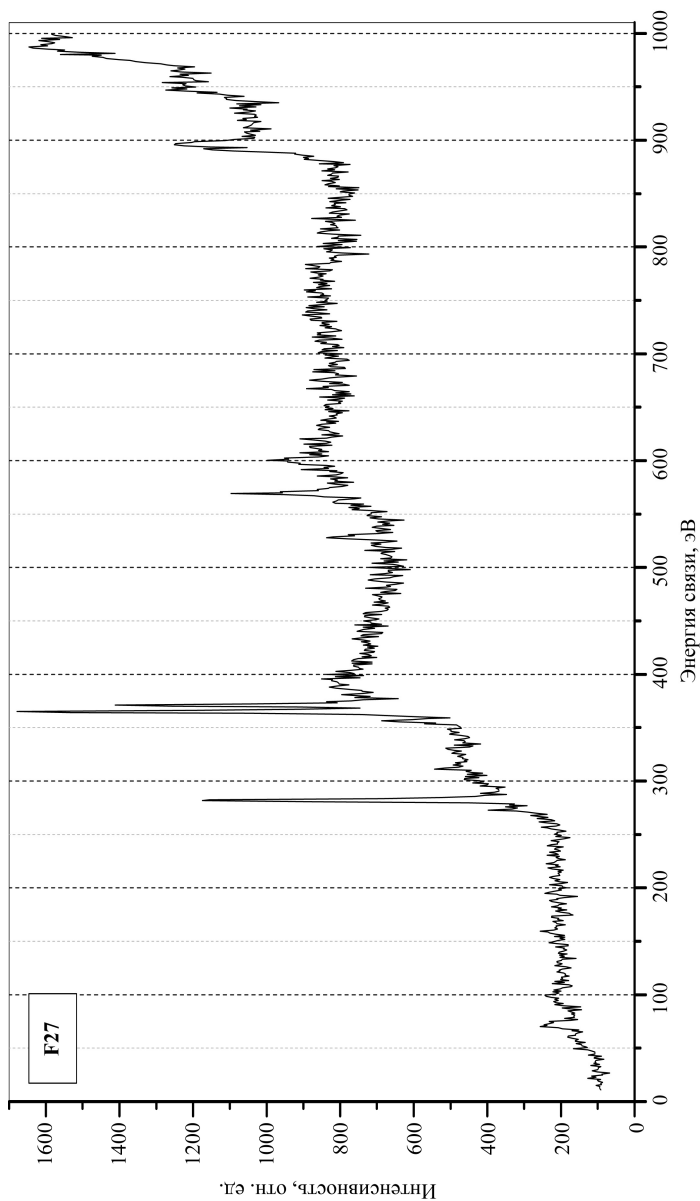


Рис. 3.51. Фотоэлектронный спектр к заданию F27

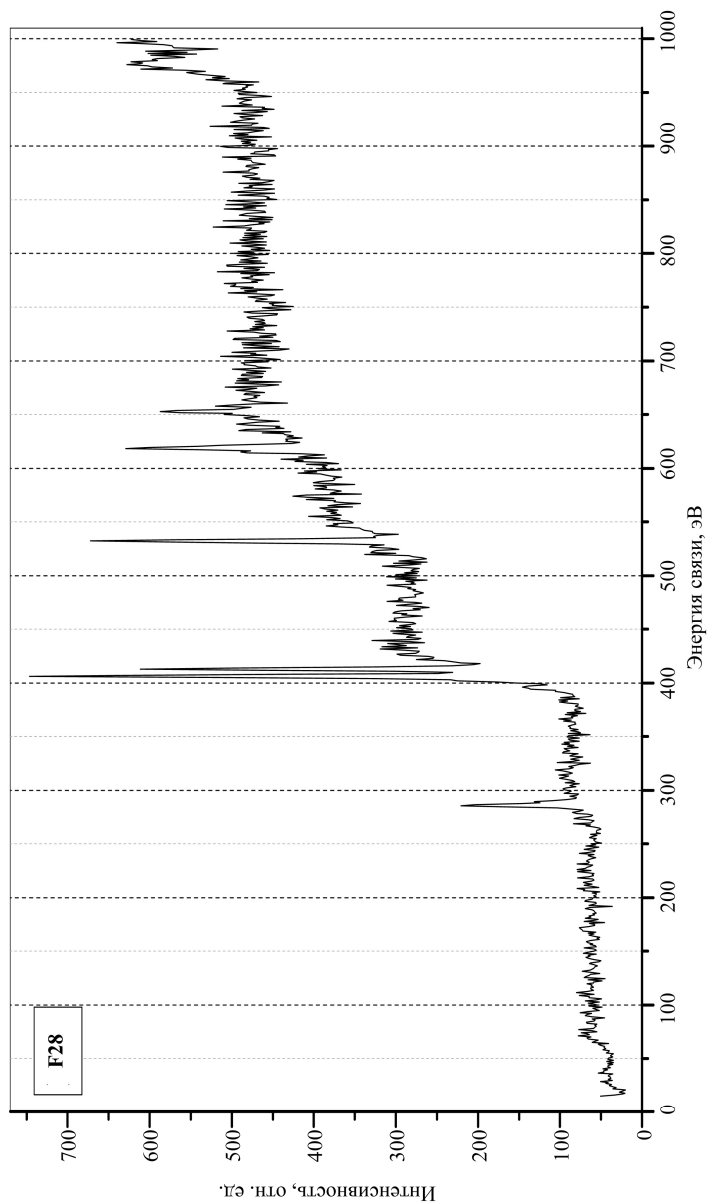


Рис. 3.52. Фотоэлектронный спектр к заданию F28

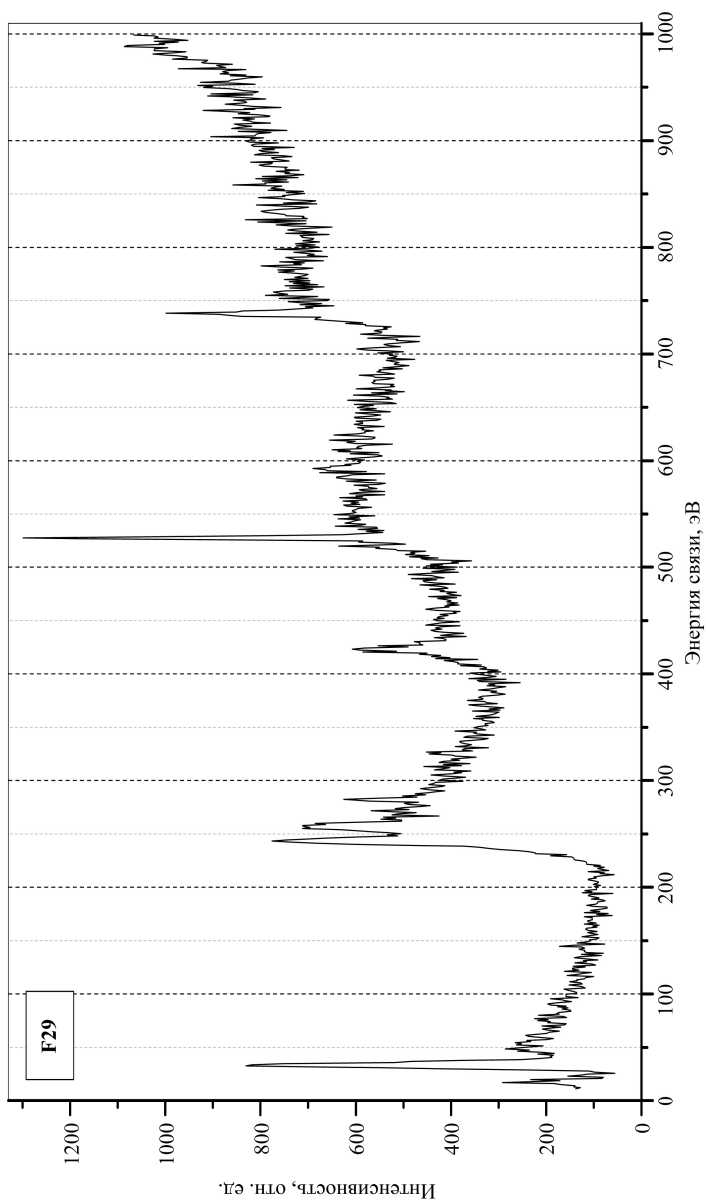


Рис. 3.53. Фотоэлектронный спектр к заданию F29

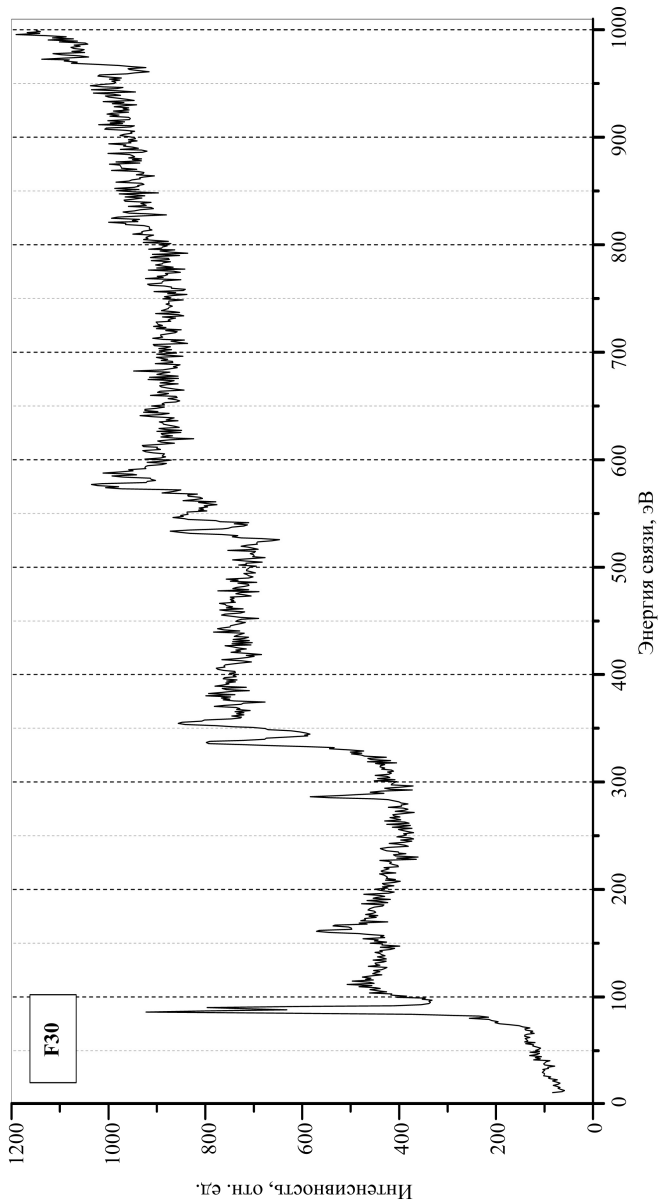


Рис. 3.54. Фотоэлектронный спектр к заданию F30

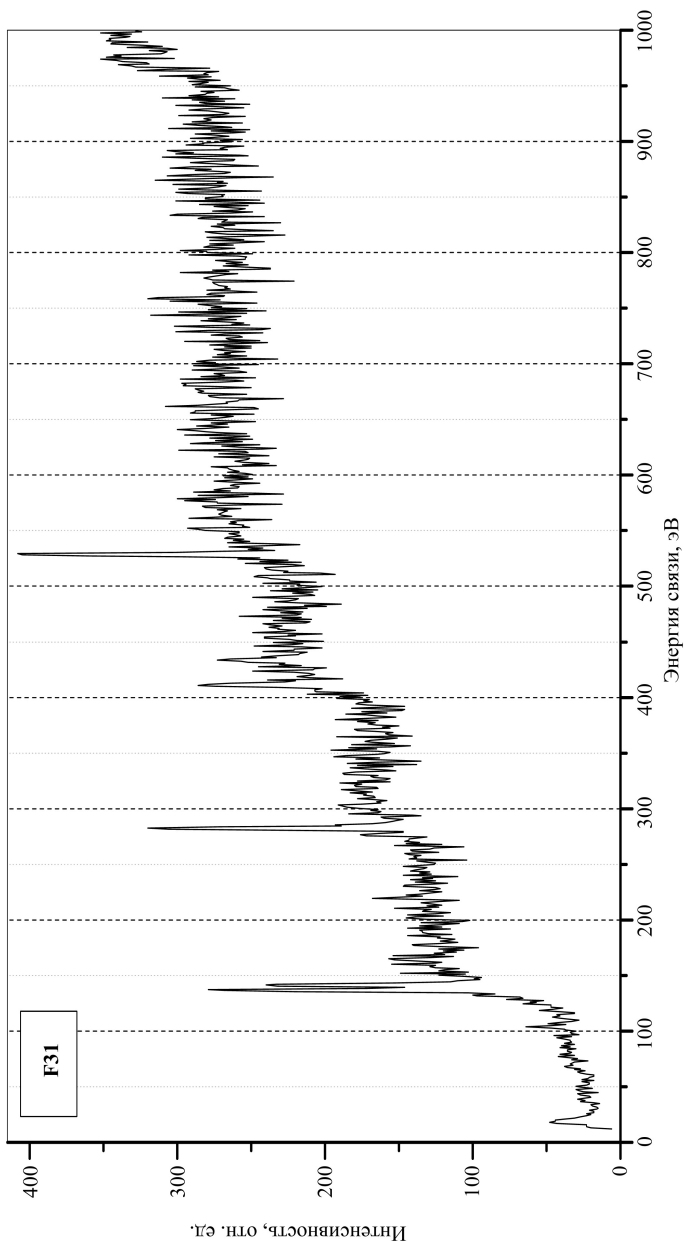


Рис. 3.55. Фотоэлектронный спектр к заданию F31

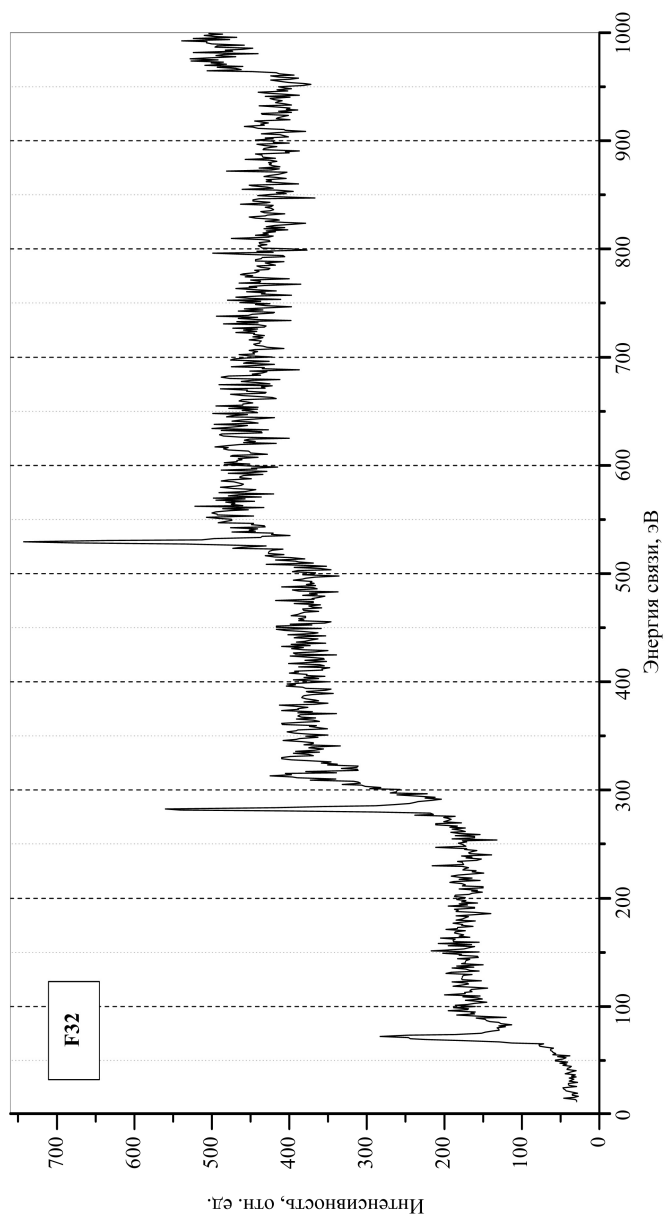


Рис. 3.56. Фотоэлектронный спектр к заданию F32

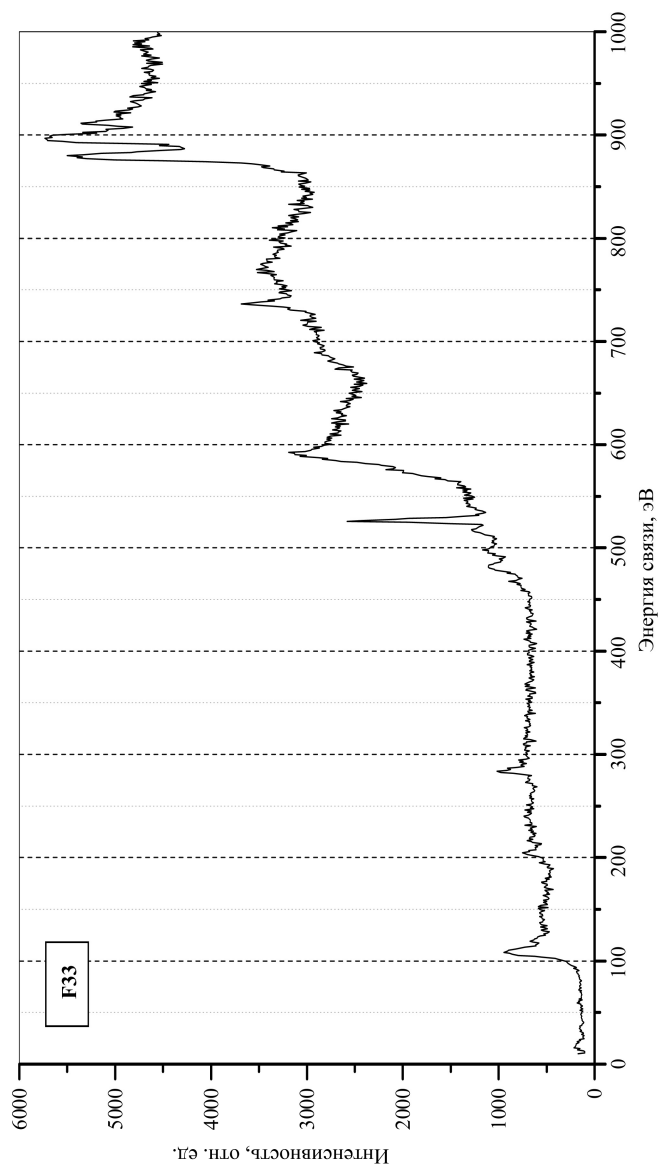


Рис. 3.57. Фотоэлектронный спектр к заданию F33

Методика обработки обзорных фотоэлектронных спектров изложена в примере 15. Необходимо идентифицировать элементы, входящие в состав приповерхностного слоя исследуемого образца, и соответствующие спектральным линиям энергетические уровни атомов. Идентификация осуществляется сравнением экспериментальных значений энергий связи с табличными (прил. 8). Как и в примере 15, в состав всех анализируемых слоев входят атомы углерода и кислорода, которым соответствуют спектральные линии со значениями энергий связи, близкими к значениям 284 и 532 эВ соответственно. Каждому из атомов более тяжелых элементов соответствует не одна, а определенный набор линий фотоэлектронной эмиссии.

При идентификации спектральных линий следует иметь в виду, что в некоторых спектрах из-за недостаточной разрешающей способности энергоанализатора спектральные дублеты, обусловленные расщеплением энергетических уровней атомов на подуровни вследствие спин-орбитального взаимодействия, не разрешены.

Обратите внимание на наличие дополнительных спектральных линий, обусловленных химическими сдвигами, а также на линии значительной ширины. Широкая спектральная линия, скорее всего, представляет собой набор не разрешаемых спектрометром нескольких близких по энергиям линий, наблюдаемых при наличии в анализируемом слое атомов одного и того же элемента в различных валентных состояниях. Кроме того, широкими являются и оже-линии, наличие которых в фотоэлектронных спектрах обусловлено оже-переходами электронов атомов на первичные вакансии, образованные вследствие фотоэлектронной эмиссии.

Следует также выписать из прил. 9 значения сечений фотоионизации всех идентифицированных энергетических уровней атомов и сравнить интенсивности линий фотоэлектронной эмиссии из атомов одного и того же элемента с соответствующими значениями сечений. Уясните физический смысл сечения фотоионизации.

Необходимо определить интенсивности наиболее интенсивных спектральных линий, характерных для каждого из элементов, и по формуле (3.64) рассчитать оценочные значения относительного содержания атомов каждого из элементов, входящих в состав анализируемого слоя, по отношению к углероду.

Ход обработки спектров должен сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями. Результаты обработки нужно представить по форме табл. 3.3, 3.4. В заключение следует сделать вывод об элементном составе анализируемого поверхностного слоя исследуемого вещества и самого вещества.

3.2.5. Определение состава поверхности образцов по спектрам резерфордского обратного рассеяния

Спектры резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He от поверхности исследуемых веществ представлены в заданиях **Г** данного подраздела в виде распечаток. Все спектры сняты при угле рассеяния $\theta = 170^\circ$; углы между направлением анализирующего ионного пучка и нормалью к поверхности образцов $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 10^\circ$.

В каждом задании приведен перечень элементов, входящих в состав исследуемого образца, а также указан основной материал, являющийся средой, тормозящей анализирующее корпускулярное излучение (ионы ^4He) на пути в глубь образца и обратно к поверхности. В виде таблицы приведены данные для калибровки шкалы спектрометра, в том числе значение начальной энергии E_0 анализирующих ионов ^4He . После распечатки спектра кратко изложен порядок выполнения задания.

Перед выполнением заданий **Г** требуется изучить материал подразд. 2.5.1, а также проработать примеры 18–22, приведенные в подразд. 3.1.7. Обработку спектров резерфордского обратного рассеяния следует проводить по схеме, использованной в примерах 18–22, представляя результаты расчетов в виде аналогичных таблиц и графических зависимостей.

Последовательность выполнения задания:

1. Графическое представление спектров обратного рассеяния.

По данным распечатки строится спектр. По оси абсцисс откладываются значения номера канала многоканального анализатора, а по оси ординат – выхода рассеяния.

2. Определение энергетической ширины канала спектрометра.

По экспериментальным данным для калибровки энергетической шкалы спектрометра, с использованием значений начальной энергии E_0 ионов ^4He и кинематического фактора рассеяния (прил. 10) по формуле (2.154) осуществляется расчет энергетической ширины канала и определяется среднее значение δE .

3. Калибровка энергетической шкалы.

С использованием среднего значения энергетической ширины канала спектрометра δE и привязки к каналу, соответствующему рассеянию анализирующих ионов ^4He на ядрах атомов углерода, осуществляется калибровка шкалы спектрометра по энергиям. В дополнение к шкале «Номер канала анализатора» строится шкала «Энергия ионов ^4He , кэВ».

4. Идентификация спектральных пиков.

На спектре идентифицируются сигналы, соответствующие каждому из элементов, входящих в состав исследуемого образца, путем

отметки номера канала, отвечающего рассеянию ионов ${}^4\text{He}$ на ядрах атомов элемента.

5. Расчет факторов тормозного сечения.

По формуле (3.66) с использованием значений сечения торможения ионов гелия на атомах тормозящей среды (прил. 11) рассчитываются значения фактора тормозного сечения ионов ${}^4\text{He}$ в тормозящей среде при их рассеянии на ядрах атомов элементов, входящих в состав образца.

6. Построение шкал глубин.

По формуле (2.155) рассчитываются значения толщины слоя δt , соответствующей одному каналу спектрометра, и на спектре строятся шкалы глубин для каждого из элементов, входящих в состав анализируемого слоя. По этим шкалам определяется толщина слоя, содержащего атомы того или иного элемента.

7. Определение слоевых содержаний атомов элементов.

Содержание атомов элемента в анализируемом слое рассчитывается по формуле (3.67). При этом значения высоты сигнала H_i от основного материала определяются по графическому изображению спектра, а площадь A_j под пиком элемента – суммированием значений выходов рассеяния в соответствующем интервале каналов за вычетом фонового сигнала. Значения сечений резерфордского рассеяния ионов ${}^4\text{He}$ на ядрах атомов элементов берутся из прил. 12.

8. Определение стехиометрии состава анализируемого слоя.

Оценочный расчет стехиометрии состава исследуемого слоя проводится по отношению слоевых содержаний атомов элементов.

9. Построение профилей распределения атомов элементов в анализируемом слое.

Для построения профилей распределения по глубине атомов того или иного элемента, введенного в приповерхностный слой материала в качестве примеси, рассчитывается по формуле (3.68) отношение концентрации атомов элемента к концентрации атомов основного материала пошагово на различных глубинах, начиная от поверхности. При этом в качестве высот сигналов H_j и H_i берутся значения выхода рассеяния для соответствующих каналов анализатора из распечатки спектра. Приближенные значения глубин можно определить по усредненному значению δt для всех элементов, содержащихся в слое.

Ход обработки спектров должен сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями.

В заключение следует обобщить информацию, полученную при обработке спектра, представить основные результаты расчетов значений фактора тормозного сечения $[\varepsilon]_j^t$, глубины δt_j и слоевого содержания элементов $(Nt)_j$ в виде таблицы и сделать выводы о составе анализируемого вещества.

Задание G1

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, кремний, титан.

Тормозящая среда: кремний.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	85	123	192	326

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
	6290	6347	6031	6128	6077	5865	5990	5915	5793	5720
60	6290	6347	6031	6128	6077	5865	5990	5915	5793	5720
70	5828	5768	5635	5669	5726	5496	5601	5514	5508	5473
80	5270	5321	5367	5266	5261	5308	5153	5036	5116	5095
90	5169	5048	5005	4909	5018	4892	4939	5013	4769	4878
100	4805	4798	4707	4830	4756	4760	4802	4718	4677	4719
110	4568	4729	4752	4664	4845	4819	4635	4629	4503	4601
120	4656	4691	4658	4540	4716	4514	4461	4368	4353	4407
130	4410	4288	4304	4300	4394	4422	4377	4402	4227	4211
140	4217	4210	4213	4180	4236	4142	4198	4276	4184	4113
150	4100	4131	4047	4087	3966	4044	4054	3923	3999	4185
160	4073	4044	3896	3937	3949	4068	3913	3967	3861	3814
170	3859	3943	3931	3922	3783	3841	3778	3660	3750	3770
180	3659	3684	3607	3613	3236	3120	2425	1887	1282	854
190	479	348	260	185	98	95	57	35	27	23
200	19	16	15	21	20	7	13	9	13	13
210	14	10	17	6	18	13	14	17	13	12
220	25	14	14	17	25	30	29	18	35	35
230	43	33	51	76	106	131	197	331	566	793
240	1273	2050	2789	3422	4233	4696	4754	5044	4703	4163
250	3357	2561	1685	1057	570	268	174	82	50	34
260	28	16	17	17	8	4	5	9	4	4
270	2	3	6	5	7	3	5	4	4	6
280	2	3	2	2	1	4	4	3	1	

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для титана и кремния. Определите толщину слоя, содержащего титан. Рассчитайте слоевые содержания титана и кислорода в титансодержащем слое и оцените его стехиометрический состав.

Задание G2

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, кремний, тантал.

Тормозящая среда: кремний.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	87	126	194	329

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
50	7601	7614	7426	7420	7195	7050	7142	6961	6941	6761
60	6762	6788	6667	6735	6512	6397	6417	6306	6378	6295
70	6101	6129	6116	6065	6014	5979	5961	5960	5898	5789
80	5681	5678	5488	5506	5692	5502	5570	5453	5612	5556
90	5369	5437	5410	5460	5278	5289	5286	5250	5247	5262
100	5228	5276	5233	5072	5155	5219	5056	5142	5066	5057
110	4903	5156	4936	4997	4963	4970	4979	4847	5064	5044
120	5173	5177	4972	5136	4977	4976	4818	4742	4743	4854
130	4866	4708	4769	4764	4720	4748	4751	4641	4550	4704
140	4573	4668	4664	4761	4762	4687	4640	4584	4469	4568
150	4587	4625	4471	4489	4544	4548	4511	4575	4402	4442
160	4530	4644	4324	4515	4527	4475	4470	4440	4447	4495
170	4115	4265	4341	4262	4331	4212	4362	4238	4247	4297
180	4217	4319	4164	4121	4135	4065	3955	3899	3592	3365
190	2677	1933	1320	852	472	305	229	162	126	86
200	63	42	24	26	21	27	33	21	18	27
210	28	23	28	20	21	19	21	26	16	19
220	22	17	17	23	23	27	25	47	46	77
230	82	108	122	108	103	70	53	35	27	22
240	16	29	17	13	16	11	14	16	24	17
250	17	17	18	25	18	23	18	30	43	59
260	62	72	86	77	63	62	43	26	30	27
270	16	17	17	17	17	12	15	26	21	21
280	14	15	25	29	26	23	20	31	25	26
290	28	35	48	40	47	46	55	58	64	62
300	48	75	96	127	145	184	191	262	344	466
310	561	753	1129	1769	3042	5444	9528	15198	21599	26663
320	30197	31232	29710	26256	20745	13965	7702	3757	1626	697
330	385	201	145	86	58	57	39	27	22	13

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для тантала и кремния. Определите толщину слоя, содержащего тантал. Рассчитайте слоевые содержания тантала и кислорода в танталосодержащем слое и оцените его стехиометрический состав.

Задание G3

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кремний, мышьяк.

Тормозящая среда: кремний.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Si	In
1,5	Канал анализатора	91	129	201	310

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
	8993	8787	8669	8538	8436	8308	8199	8039	7895	7767
60	8993	8787	8669	8538	8436	8308	8199	8039	7895	7767
70	7870	7635	7515	7545	7380	7370	7327	7171	7216	7045
80	7039	6796	6774	6747	6701	6549	6490	6422	6352	6398
90	6183	6262	6276	6282	6167	6115	6210	6012	6072	5938
100	5987	5818	6035	5792	5994	5700	5806	5765	5687	5794
110	5560	5609	5551	5691	5456	5500	5304	5573	5479	5409
120	5312	5367	5395	5220	5325	5207	5372	5100	5407	5202
130	5029	5160	5185	5170	5042	5168	5037	5090	5076	4852
140	5030	4936	5077	4882	4855	4964	4903	4896	4883	4911
150	4775	4864	4793	4819	4820	4821	4795	4740	4685	4670
160	4627	4747	4766	4539	4684	4599	4369	4450	4573	4546
170	4406	4478	4529	4322	4475	4470	4436	4375	4385	4404
180	4365	4383	4319	4225	4416	4258	4255	4248	4132	4245
190	4100	4013	4116	4152	4002	4072	4131	4104	3929	3797
200	3182	2257	1137	591	308	258	198	151	100	86
210	46	35	20	18	8	19	17	9	9	19
220	11	9	7	6	8	8	9	12	11	9
230	15	6	7	3	2	4	9	5	3	6
240	11	6	4	4	7	2	3	4	3	3
250	2	3	2	2	3	3	10	6	3	3
260	4	4	3	7	9	4	3	6	14	20
270	22	40	37	72	74	104	119	154	166	190
280	190	181	173	146	79	53	48	19	11	6
290	9	3	2	4	4	3	2	2		

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для мышьяка и кремния. Рассчитайте слоевое содержание примеси мышьяка в кремнии. Постройте профиль распределения атомов мышьяка в кремнии по глубине.

Задание G4

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, ванадий, медь.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4656	4527	4363	4363	4386	4161	4192	4110	3855	3876
50	3811	3729	3627	3607	3451	3414	3353	3331	3342	3324
60	3263	3147	3057	2975	2971	2945	2884	2818	2811	2719
70	2645	2565	2570	2424	2491	2382	2167	2123	1957	1604
80	1341	980	746	678	558	549	483	435	363	400
90	371	370	386	360	366	364	374	396	384	399
100	378	346	353	395	388	392	391	436	410	478
110	441	466	437	503	557	611	676	725	916	1051
120	1203	1275	1174	1022	771	518	361	221	178	156
130	156	150	149	134	150	150	175	153	166	165
140	157	150	157	177	144	177	159	166	133	174
150	157	154	142	150	137	140	149	176	168	138
160	161	160	147	148	179	156	149	160	164	174
170	178	156	179	156	157	188	190	218	208	177
180	224	203	230	220	211	206	254	252	260	279
190	306	317	321	302	269	222	229	238	242	215
200	231	231	204	223	241	200	188	181	228	242
210	209	255	226	259	258	276	266	281	266	307
220	319	329	373	330	332	321	352	316	269	212
230	167	210	209	178	171	195	220	216	224	267
240	255	298	313	354	399	477	577	791	1139	1851
250	2998	4394	5740	6974	7391	7402	6293	4749	2980	1687
260	1015	799	894	1301	1836	2461	2953	3024	2630	2140
270	1285	758	394	185	101	53	40	19	17	15
280	13	8	5	4	7	10	7	14	8	12
290	10	17	25	18	21	22	23	17	22	20
300	21	22	18	21	26	24	25	30	29	30
310	35	35	46	31	37	27	43	31	33	23
320	21	27	10	11	2	2	0	1		

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, ванадия, меди и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания ванадия, меди и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов меди и ванадия.

Задание G5

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, ванадий, ниобий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4296	4067	3866	3844	3644	3795	3625	3677	3487	3493
50	3383	3331	3387	3202	3265	3152	3128	3075	2970	2999
60	2995	2814	2786	2853	2859	2934	2721	2785	2688	2589
70	2600	2567	2557	2533	2499	2274	2213	2114	1865	1618
80	1275	1013	905	807	784	723	717	689	655	654
90	646	592	625	561	629	538	576	583	594	570
100	559	547	520	483	522	531	554	534	516	530
110	516	529	525	604	670	754	879	1083	1202	1215
120	1233	1174	1080	910	754	553	326	261	195	157
130	147	155	142	140	143	149	140	130	140	149
140	120	156	115	140	128	125	108	115	117	105
150	123	121	123	121	132	103	118	102	92	126
160	134	108	113	116	115	96	110	121	129	104
170	116	101	114	112	93	127	108	115	103	110
180	116	106	115	107	122	104	130	119	132	137
190	139	152	159	176	136	140	121	111	137	139
200	111	104	98	115	97	112	89	95	107	86
210	98	115	114	114	133	113	111	90	93	70
220	62	62	62	50	49	47	52	55	40	44
230	51	36	41	36	27	42	42	42	45	53
240	57	65	85	92	145	222	318	569	921	1465
250	1925	2334	2494	2193	1573	1029	590	261	146	102
260	70	49	50	54	34	37	34	39	47	66
270	65	72	93	89	75	58	53	64	54	52
280	69	100	108	135	162	210	280	437	649	1067
290	1770	2965	4899	7300	9840	12033	12718	12341	10043	7251
300	4561	2412	1191	474	237	123	88	49	41	36
310	32	18	18	9	17	9	19	16	27	34
320	42	48	41	32	28	14	11	7	1	2
330	4	3	1	2	0	1	0	2	0	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, ванадия, ниобия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания ванадия, ниобия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов ванадия и ниобия.

368

Задание G6

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, цирконий, тантал.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4440	4575	4302	4346	4328	4137	3842	4040	3886	3793
50	3683	3842	3658	3565	3459	3536	3529	3327	3358	3203
60	3299	3168	3236	3136	3027	3098	2977	2995	2988	2917
70	2867	2825	2845	2709	2602	2312	2102	1781	1291	945
80	768	600	557	506	501	471	511	449	402	408
90	391	413	387	368	384	352	389	383	391	349
100	335	369	343	346	350	344	366	366	407	381
110	412	449	533	613	832	1075	1298	1494	1647	1650
120	1710	1663	1581	1321	1123	832	572	450	396	351
130	362	328	309	317	332	309	304	311	267	338
140	304	321	301	295	322	300	303	330	344	296
150	289	335	316	334	289	307	286	302	284	283
160	326	342	298	314	357	339	339	306	324	290
170	309	284	322	330	299	308	278	325	292	302
180	307	324	327	346	340	342	365	339	367	357
190	360	327	365	386	352	345	370	373	362	338
200	317	333	325	322	289	324	345	352	348	383
210	357	298	344	351	337	333	332	332	354	340
220	338	338	317	359	352	329	332	322	329	321
230	334	299	329	329	339	354	301	359	345	313
240	359	320	318	363	344	374	349	350	351	358
250	349	349	351	335	369	363	403	356	361	396
260	407	393	408	451	435	436	461	458	500	507
270	487	541	515	569	583	581	599	628	589	781
280	1020	1268	1959	3107	4600	6679	8922	11208	12965	14095
290	14547	14354	13612	11996	9900	7387	5276	3206	1915	953
300	523	311	172	116	105	83	96	106	124	160
310	173	225	303	353	497	729	1108	1727	2904	4908
320	8006	12188	16206	18718	18688	15258	10527	6338	3030	1381
330	608	281	132	93	53	34	30	19	18	12
340	13	5	2	4	2	3	1	5	1	2

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, циркония, тантала и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания циркония, тантала и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов циркония и тантала.

Задание G7

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, титан, ниобий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4765	4712	4409	4344	4266	4179	4132	4097	3875	3934
50	3755	3725	3547	3650	3468	3388	3485	3350	3386	3318
60	3276	3143	3033	3073	2980	2918	2858	2864	2787	2723
70	2640	2727	2600	2534	2420	2300	2133	1850	1471	1121
80	850	597	498	480	471	482	424	334	326	270
90	248	268	257	255	229	238	246	212	229	229
100	239	233	224	221	230	251	262	277	255	338
110	399	439	472	571	719	863	1072	1299	1448	1461
120	1369	1285	1116	933	748	465	286	172	115	104
130	87	83	70	82	86	86	67	75	68	70
140	66	72	68	69	68	90	76	64	73	73
150	59	60	93	69	73	81	63	63	63	86
160	81	86	97	78	90	72	61	66	58	57
170	56	60	45	59	54	61	48	49	51	70
180	50	57	48	49	74	54	58	90	106	131
190	126	148	115	136	110	98	85	78	81	86
200	65	58	66	53	50	48	56	44	47	47
210	41	62	51	60	46	50	50	44	51	37
220	57	59	51	67	74	67	54	72	72	61
230	58	77	72	70	109	124	169	225	392	576
240	910	1419	1970	2651	3191	3649	3368	2969	2167	1510
250	835	441	247	135	109	79	57	73	82	71
260	73	65	42	62	72	65	64	89	103	113
270	113	102	99	84	60	67	52	42	71	67
280	101	124	148	173	221	321	396	546	842	1398
290	2455	4226	6865	10235	12806	14370	14042	11681	7900	4710
300	2291	992	428	222	134	98	57	40	41	12
310	21	16	18	23	15	28	31	47	64	56
320	56	61	35	23	15	18	4	12	1	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, титана, ниобия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания титана, ниобия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов титана и ниобия.

370

Задание G8

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, медь, ниобий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
	3981	3864	3832	3739	3668	3635	3493	3426	3342	3350
40	3290	3331	3193	3103	3026	3128	2966	2942	2917	2990
50	2882	2797	2847	2738	2749	2734	2679	2564	2609	2595
70	2596	2516	2498	2448	2360	2370	2159	2262	2045	1857
80	1548	1199	876	601	440	350	313	260	210	181
90	184	148	153	124	115	121	99	105	109	87
100	113	101	113	111	104	108	106	97	92	96
110	113	97	110	120	129	151	182	271	372	483
120	616	847	874	886	738	557	355	244	157	108
130	65	76	92	102	93	74	97	75	94	84
140	84	94	95	101	83	90	72	74	76	73
150	58	61	77	62	83	78	62	80	65	50
160	65	76	80	78	67	81	82	63	87	80
170	66	71	60	69	82	72	76	82	56	56
180	65	81	50	69	78	82	54	76	88	89
190	112	152	169	157	140	162	111	96	85	91
200	72	75	83	76	83	77	74	79	85	71
210	79	77	77	81	83	85	88	83	70	79
220	74	78	80	67	96	75	85	81	86	92
230	84	96	70	83	81	97	82	88	82	77
240	75	79	81	89	108	100	124	114	110	107
250	123	142	127	133	165	174	159	193	160	204
260	259	271	288	374	543	782	1166	1784	2287	2522
270	2374	1865	1377	803	483	249	155	112	98	105
280	123	122	134	173	229	236	314	409	573	893
290	1472	2491	4173	6828	9625	12647	14162	14622	13122	10174
300	6789	3514	1707	779	350	207	123	101	72	50
310	25	27	19	22	8	4	13	24	26	33
320	45	53	51	52	39	25	13	9	6	2

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, меди, ниобия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания меди, ниобия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов меди и ниобия.

Задание G9

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, ниобий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4446	4359	4251	4055	4081	3891	3860	3852	3800	3782
50	3663	3578	3582	3435	3446	3390	3325	3314	3166	3211
60	3027	3095	3061	2922	2921	2977	2839	2830	2778	2759
70	2740	2698	2675	2639	2620	2505	2510	2350	2253	2000
80	1715	1482	1137	865	578	527	476	391	317	292
90	278	291	305	283	265	265	266	270	252	260
100	210	283	241	247	247	237	231	248	236	236
110	236	259	262	278	274	354	440	444	638	794
120	1015	1126	1106	979	885	640	473	270	186	160
130	132	116	122	120	114	126	115	117	146	136
140	112	121	145	109	121	103	120	114	109	119
150	101	107	108	118	110	96	132	114	135	99
160	108	134	118	119	111	112	93	115	100	125
170	127	113	113	112	127	135	123	113	115	123
180	152	99	119	141	131	141	143	177	161	169
190	197	177	191	196	187	166	159	147	132	133
200	139	103	104	104	104	102	99	96	79	108
210	94	102	76	80	77	104	91	80	88	72
220	57	60	34	51	57	60	55	77	73	74
230	91	87	76	65	39	48	25	38	33	35
240	37	36	24	25	27	36	45	44	42	47
250	33	26	42	42	47	35	53	53	67	71
260	72	70	61	58	64	70	72	86	120	115
270	129	118	138	115	99	85	76	79	60	81
280	106	129	170	208	203	316	363	533	832	1337
290	2150	3653	5881	8806	11759	14088	14948	14014	11546	8116
300	4963	2536	1169	563	280	165	101	78	69	41
310	43	49	39	46	32	42	37	47	63	83
320	92	112	97	85	93	68	27	15	6	4
330	2	2	2	2	0	1	3	0	2	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, ниобия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания ниобия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов ниобия и кислорода.

372

Задание G10

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, титан, хром.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
	4320	4286	3935	3993	3939	3698	3584	3667	3659	3542
40	4320	4286	3935	3993	3939	3698	3584	3667	3659	3542
50	3383	3412	3303	3366	3177	3242	3171	3073	3008	2914
60	2951	2876	2863	2897	2780	2822	2656	2711	2613	2540
70	2491	2487	2378	2219	2107	1836	1553	1278	876	649
80	480	418	341	337	345	340	318	268	263	247
90	208	210	218	229	222	216	194	211	224	174
100	211	191	201	213	228	224	255	317	306	408
110	420	442	602	681	825	1044	1227	1395	1456	1511
120	1378	1333	1284	1118	855	573	376	229	186	126
130	89	89	78	90	91	90	79	58	76	83
140	79	82	89	98	65	84	75	92	80	80
150	75	96	88	70	97	79	89	87	93	93
160	101	106	77	76	72	57	82	75	61	73
170	64	79	67	68	59	73	66	57	63	64
180	68	71	81	76	86	92	128	129	144	128
190	121	116	98	100	115	101	96	85	79	87
200	87	78	74	87	75	82	82	83	91	95
210	73	78	96	95	96	90	87	96	81	98
220	97	105	105	99	115	107	112	106	112	128
230	117	142	165	201	273	336	471	692	1031	1370
240	1981	2668	3054	3316	3291	2953	2412	1815	1576	1590
250	1848	2649	3766	5003	6154	6796	7076	6984	6247	5292
260	3944	2693	1519	839	456	244	154	114	78	50
270	39	20	18	15	8	3	5	6	3	5
280	4	3	6	4	4	2	1	2	2	5

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, титана, хрома и кислорода. Рассчитайте слоевое содержание титана, хрома и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов титана и хрома.

Задание G11

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, цирконий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4051	4095	3957	3651	3710	3691	3484	3508	3438	3507
50	3233	3179	3218	3242	3092	3098	3046	2875	2956	2909
60	2944	2809	2754	2712	2701	2667	2615	2591	2639	2610
70	2545	2516	2394	2446	2420	2406	2236	2274	2038	1793
80	1520	1209	854	657	530	499	441	426	339	309
90	341	317	304	284	298	322	304	308	321	309
100	301	317	284	280	303	278	233	287	263	301
110	309	341	275	319	329	413	501	626	763	1011
120	1257	1391	1374	1283	1040	812	525	340	250	204
130	191	162	184	166	177	176	195	194	172	151
140	180	162	160	191	181	153	176	165	190	168
150	160	166	183	185	179	159	166	194	173	179
160	193	174	187	209	177	214	188	169	211	201
170	196	214	190	181	196	179	197	183	174	216
180	183	197	196	229	222	203	205	223	230	218
190	262	275	275	285	272	272	227	228	224	202
200	204	224	161	206	192	190	189	195	186	161
210	204	188	175	186	189	195	158	147	172	160
220	146	192	152	174	138	163	162	155	138	151
230	139	100	103	97	98	102	92	81	108	86
240	98	88	109	83	97	94	90	114	87	103
250	101	98	112	110	96	109	129	124	121	122
260	133	116	131	111	110	129	112	109	130	147
270	144	153	159	150	171	162	152	176	170	176
280	198	219	284	311	464	581	826	1248	2039	3399
290	5168	7407	9799	11981	13206	13697	12731	11060	8399	5698
300	3290	1774	879	398	185	107	67	39	36	38
310	30	24	23	22	33	24	25	32	36	30
320	34	38	35	25	28	18	7	4	3	3

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, циркония и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания циркония и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов циркония и кислорода.

Задание G12

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, медь, тантал.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4746	4767	4562	4545	4495	4196	4105	4060	4133	3864
50	3845	3757	3732	3694	3568	3576	3560	3428	3340	3325
60	3363	3288	3171	3171	3125	3025	3045	2959	2926	2859
70	2934	2865	2803	2760	2748	2679	2656	2548	2424	2353
80	2139	1965	1567	1212	898	753	553	522	414	377
90	362	332	310	344	274	311	297	315	332	278
100	297	290	286	296	279	282	277	288	291	288
110	261	286	288	301	269	301	325	382	436	613
120	723	928	1021	1053	942	612	401	267	183	171
130	121	138	114	138	130	89	113	129	125	129
140	116	118	113	115	109	114	103	117	114	111
150	118	124	101	127	116	120	100	109	102	132
160	130	110	121	111	104	116	127	125	118	120
170	121	128	103	107	112	119	118	121	128	89
180	119	122	131	139	125	125	144	128	143	149
190	176	180	188	226	220	231	216	174	162	140
200	128	108	116	116	123	99	124	139	115	127
210	130	108	94	104	117	119	121	126	136	109
220	114	110	94	121	104	103	82	119	99	99
230	89	75	86	58	66	54	42	57	42	52
240	63	66	69	44	52	51	78	68	59	68
250	83	69	100	108	100	79	107	118	137	141
260	146	183	214	248	297	397	558	949	1301	1943
270	2467	2427	2164	1843	1206	767	428	238	131	101
280	68	45	19	18	30	23	28	23	31	23
290	21	36	44	36	61	56	65	52	61	47
300	52	65	60	69	78	78	113	145	164	200
310	291	335	416	579	767	1062	1637	2678	4501	7655
320	12190	18078	22761	24543	22198	16323	9729	4986	2230	908
330	435	216	154	72	44	31	29	20	19	12
340	10	5	5	5	1	1	2	1	2	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, меди, тантала и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания меди, тантала и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов меди и тантала.

Задание G13

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, титан, тантал.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4094	3953	3772	3703	3841	3623	3687	3678	3473	3530
50	3334	3337	3186	3278	3233	3171	3031	2993	2936	3098
60	2926	2854	2827	2884	2741	2702	2731	2658	2663	2505
70	2604	2526	2398	2466	2398	2308	2213	2129	1947	1637
80	1285	962	716	504	382	312	331	254	211	191
90	173	153	172	158	136	125	128	137	159	166
100	156	175	155	174	136	158	148	138	156	194
110	168	158	169	197	236	276	377	485	719	906
120	1070	1301	1287	1209	995	710	436	238	142	118
130	85	83	84	98	91	75	78	90	89	88
140	72	81	70	79	79	96	92	85	78	72
150	78	69	62	71	89	78	80	99	102	96
160	99	106	104	111	107	99	102	113	90	77
170	86	82	98	86	99	82	74	80	70	69
180	92	84	83	85	88	112	89	123	100	137
190	121	131	156	180	158	139	142	143	116	134
200	120	114	148	139	118	125	118	125	115	134
210	125	131	139	119	131	137	142	121	122	105
220	110	131	112	132	115	123	115	112	132	133
230	120	101	110	105	115	120	140	138	182	245
240	291	393	546	790	1227	1697	2358	2958	3401	3410
250	3181	2633	1868	1207	690	408	250	186	147	112
260	104	123	115	116	140	168	171	159	185	148
270	149	168	153	160	141	126	167	116	101	75
280	57	33	25	18	22	21	14	25	24	16
290	25	39	40	39	50	44	59	68	47	64
300	69	61	65	56	88	74	87	104	147	130
310	174	235	236	349	421	600	740	1147	1765	2986
320	5095	8364	12819	17805	20987	20732	16906	11219	6059	2810
330	1110	496	237	134	88	53	43	17	22	18
340	13	7	5	0	0	1	2	2	2	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, титана, тантала и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания титана, тантала и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов титана и тантала.

376

Задание G14

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, хром.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4806	4854	4511	4636	4447	4476	4291	4170	4142	4027
50	3992	3827	3909	3890	3729	3667	3813	3583	3512	3532
60	3549	3515	3435	3433	3329	3336	3354	3214	3238	3207
70	3185	3131	3080	2915	2845	2695	2565	2241	1927	1435
80	1030	724	446	432	434	396	391	317	264	277
90	243	217	233	201	186	200	211	209	182	204
100	167	218	165	168	181	191	201	199	191	246
110	280	327	337	455	549	666	877	1150	1325	1481
120	1517	1459	1291	999	682	388	226	124	103	83
130	78	65	78	76	76	66	66	69	64	71
140	76	74	64	74	74	61	60	62	68	74
150	55	61	65	62	60	53	87	68	67	84
160	92	90	81	65	66	71	65	62	59	58
170	44	55	45	48	55	47	52	60	50	62
180	53	53	61	87	63	67	65	74	79	70
190	102	89	64	78	92	63	72	57	52	62
200	61	64	59	59	59	62	64	72	59	83
210	97	85	95	87	95	102	74	102	81	86
220	92	76	89	68	71	100	82	77	68	87
230	61	73	91	86	90	95	126	143	130	158
240	203	222	279	330	498	608	1003	1634	2649	4057
250	5664	7135	8493	8979	9055	8653	7692	6196	4325	2707
260	1423	718	344	211	154	115	100	87	66	60
270	50	36	28	22	21	24	11	22	17	19
280	16	18	19	23	25	12	19	24	20	17
290	25	25	26	20	28	18	21	19	15	9
300	17	14	10	17	10	4	10	8	10	3
310	7	6	7	13	10	17	18	24	21	8
320	14	7	7	3	2	2	1	0		

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, хрома и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания хрома и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов хрома и кислорода.

Задание G15

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, ванадий, хром.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4794	4609	4484	4380	4402	4238	4111	3983	3968	3866
50	3897	3789	3864	3724	3490	3561	3459	3535	3318	3237
60	3268	3172	3228	3090	3025	3061	3017	2853	2746	2741
70	2772	2675	2638	2420	2275	2063	1675	1171	883	666
80	539	466	450	468	435	427	415	340	327	294
90	269	257	272	296	264	276	272	285	293	258
100	263	268	277	278	286	336	336	389	383	429
110	479	558	692	826	1032	1237	1337	1453	1484	1455
120	1411	1302	1237	990	787	567	393	182	120	79
130	91	71	80	67	86	71	78	81	79	76
140	67	74	59	75	85	85	56	76	68	74
150	87	66	70	57	78	64	69	86	88	80
160	72	61	66	62	53	52	53	57	46	42
170	56	49	66	49	52	63	58	49	39	55
180	70	61	61	62	69	92	104	93	100	103
190	81	104	125	116	85	107	92	103	101	98
200	101	83	84	75	78	64	72	73	64	65
210	64	78	69	72	72	77	71	87	75	92
220	80	93	100	94	88	84	88	83	77	88
230	120	89	119	139	150	159	170	209	259	358
240	381	520	686	919	1463	2197	3318	4704	6127	7607
250	8474	9529	10352	11042	11248	10436	9022	6820	4557	2616
260	1348	599	280	177	112	79	58	28	29	28
270	26	15	31	24	29	19	13	10	20	18
280	9	12	19	19	18	14	15	15	13	27
290	25	25	25	32	34	33	36	27	29	26
300	17	22	22	15	18	20	16	35	30	46
310	47	71	86	109	105	112	78	68	35	20
320	18	17	15	6	9	3	1	0	2	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, ванадия, хрома и кислорода. Рассчитайте слоевое содержание кислорода, а также общее слоевое содержание атомов ванадия и хрома, принимая в качестве σ_j среднее значение сечений резерфордского рассеяния на ядрах атомов этих элементов. Постройте профили совместного распределения по глубине атомов ванадия и хрома.

Задание G16

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, медь.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4696	4659	4437	4471	4276	4240	4203	4130	4035	4049
50	3898	3805	3738	3619	3511	3593	3319	3313	3330	3240
60	3282	3242	3061	3113	3065	2953	3026	2939	2981	2925
70	2792	2739	2784	2748	2659	2666	2561	2564	2441	2430
80	2366	2208	2045	1861	1557	1236	805	584	435	350
90	379	295	284	313	277	309	305	292	259	300
100	275	274	285	260	295	304	281	255	275	271
110	277	251	263	250	287	277	303	302	336	361
120	356	382	391	337	301	222	181	166	162	149
130	152	143	143	150	143	138	134	149	147	144
140	128	128	138	134	136	143	158	114	157	151
150	153	113	137	136	124	140	143	136	145	153
160	115	144	144	121	136	160	149	153	138	160
170	127	125	145	140	107	143	130	148	130	131
180	113	119	135	147	127	143	144	136	136	129
190	166	133	183	168	188	201	179	181	195	171
200	159	148	174	168	178	171	169	145	151	139
210	116	109	132	101	117	90	122	117	132	126
220	129	133	126	138	133	157	157	186	163	180
230	178	156	164	118	109	85	63	55	76	59
240	82	71	83	81	85	89	107	74	98	101
250	95	89	123	111	95	118	121	144	160	149
260	177	185	196	209	242	296	361	541	786	1173
270	1817	2323	2623	2317	1838	1277	710	366	142	63
280	44	24	15	15	15	15	17	9	8	13
290	15	13	8	17	18	19	9	22	22	12
300	14	19	27	28	23	17	25	30	18	22
310	25	31	16	32	26	37	30	38	33	51
320	51	58	50	49	42	24	20	13	6	2

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, меди и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания меди и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов меди и кислорода.

Задание G17

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, ванадий, тантал.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
	4480	4577	4248	4178	4144	4131	3914	3907	3797	3850
40	4480	4577	4248	4178	4144	4131	3914	3907	3797	3850
50	3661	3550	3585	3531	3489	3463	3389	3335	3224	3266
60	3197	3228	3117	3164	3009	3084	2953	2932	2851	2818
70	2791	2757	2745	2786	2644	2750	2567	2535	2408	2249
80	2022	1703	1323	897	671	468	327	244	200	181
90	168	137	143	125	123	131	101	107	102	85
100	102	96	93	99	108	89	88	83	85	87
110	72	84	77	97	103	115	119	174	248	414
120	615	722	935	965	792	520	318	200	111	72
130	69	61	67	56	47	72	58	58	58	50
140	50	44	55	55	54	54	46	48	60	44
150	57	74	53	51	42	49	41	49	53	66
160	59	40	36	50	64	57	63	60	55	53
170	45	44	49	49	47	49	54	59	46	48
180	48	49	52	62	38	54	58	56	47	58
190	64	81	63	79	102	88	80	80	71	47
200	60	65	52	59	53	41	57	45	45	61
210	51	41	41	55	43	57	59	59	50	51
220	51	62	48	58	59	57	58	43	59	59
230	71	59	52	54	45	65	54	52	76	58
240	81	77	93	95	112	121	153	181	275	393
250	626	1149	1972	2882	3614	3735	3243	2181	1258	606
260	297	148	70	85	85	62	53	36	38	44
270	32	60	97	101	133	165	162	133	113	64
280	55	31	23	12	18	16	12	9	15	11
290	14	19	15	28	21	33	34	27	26	18
300	26	28	27	24	29	44	47	68	89	120
310	126	186	211	278	342	494	782	1184	1872	3161
320	5445	8923	12738	16166	16729	14237	9622	5373	2374	1009
330	470	187	123	71	57	33	27	20	14	10
340	5	4	3	5	1	2	1	1	1	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, ванадия, тантала и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания ванадия, тантала и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов ванадия и тантала.

Задание G18

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, титан, цирконий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4655	4651	4574	4324	4317	4219	4099	4026	3880	3956
50	3792	3712	3682	3600	3573	3431	3436	3445	3356	3279
60	3265	3137	3176	3102	3058	3090	3053	2912	2909	2823
70	2796	2631	2542	2311	2037	1747	1447	1203	1033	915
80	904	818	765	727	783	790	800	703	671	584
90	656	698	635	667	699	665	716	678	677	674
100	659	665	716	692	722	718	789	799	790	895
110	945	1183	1301	1549	1748	1890	1935	1916	1910	1977
120	1862	1876	1778	1473	1211	915	691	565	476	473
130	486	485	477	462	481	473	504	515	477	495
140	478	521	482	521	518	469	474	442	515	465
150	488	487	500	564	506	503	525	563	527	543
160	517	478	533	487	462	499	461	546	465	482
170	504	522	481	523	500	506	533	546	558	497
180	583	581	531	576	575	595	578	631	645	641
190	582	621	593	584	527	534	561	563	545	593
200	557	563	533	496	536	548	539	552	489	545
210	492	521	527	511	556	578	542	585	530	529
220	516	539	528	478	476	449	489	493	476	526
230	542	576	650	814	1033	1260	1708	2226	2916	3470
240	3798	3810	3218	2675	1907	1349	988	702	627	589
250	522	515	514	465	496	473	536	518	530	555
260	556	559	519	541	486	507	500	528	540	552
270	614	626	606	598	581	594	540	673	623	706
280	804	980	1208	1735	2490	3943	5713	7989	10573	12687
290	14449	15264	15868	15931	14964	13505	11133	8233	5293	3068
300	1618	825	399	218	166	111	95	80	73	86
310	83	71	84	67	51	32	33	21	28	19
320	26	23	24	16	10	9	8	5	2	2
330	2	0	2	1	0	1	0	0	2	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, титана, циркония и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания титана, циркония и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов титана и циркония.

Задание G19

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, цирконий, ниобий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
40	4297	4030	4058	3984	3900	3807	3655	3751	3661	3617
50	3473	3484	3446	3340	3281	3317	3242	3089	3168	3101
60	2905	2990	2922	3029	2798	2836	2770	2774	2679	2640
70	2673	2535	2515	2434	2193	2150	1832	1432	1123	835
80	584	469	462	425	477	428	413	372	337	320
90	315	290	290	286	282	317	299	280	280	290
100	302	280	281	318	315	292	320	362	399	423
110	473	564	630	824	965	1202	1309	1498	1562	1527
120	1351	1237	1210	1072	843	598	401	306	201	178
130	171	151	160	160	153	153	158	148	121	144
140	158	141	152	163	141	160	141	161	155	155
150	153	155	152	173	165	162	160	160	142	190
160	179	153	190	154	160	122	129	118	150	128
170	116	137	132	130	131	136	134	143	134	150
180	143	171	168	140	164	170	204	177	215	188
190	184	204	190	189	231	201	224	200	196	176
200	182	155	145	174	145	147	169	140	164	172
210	174	168	139	157	137	148	134	156	157	188
220	169	188	175	209	185	158	177	164	148	154
230	123	146	161	130	125	123	127	140	147	114
240	154	122	130	142	154	154	138	120	135	146
250	133	170	162	150	160	175	155	183	141	209
260	221	199	181	241	208	213	221	262	274	283
270	282	299	302	311	291	296	342	388	481	578
280	817	1134	1791	2847	4586	6652	8877	11221	13019	13834
290	13908	14308	14543	15613	16130	16565	16346	14512	11369	7889
300	4524	2337	1105	493	264	146	100	68	48	58
310	22	29	31	32	39	47	53	52	49	59
320	53	53	56	29	20	24	12	11	2	2
330	3	1	1	1	2	2	2	2	2	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, циркония, ниобия и кислорода. Рассчитайте слоевое содержание кислорода, а также общее слоевое содержание атомов циркония и ниобия, принимая в качестве σ_j среднее значение сечений резерфордского рассеяния на ядрах атомов этих элементов. Постройте профили распределения по глубине совместно атомов циркония и ниобия.

Задание G20

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, никель, иридий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
20	2962	3252	2962	2782	2635	2333	2382	2254	2190	2243
30	2052	1959	1998	1864	1965	1874	1888	1794	1868	1730
40	1716	1775	1715	1667	1682	1618	1544	1542	1560	1522
50	1502	1474	1467	1501	1380	1407	1372	1347	1325	1400
60	1323	1284	1293	1244	1268	1203	1219	1222	1202	1180
70	1118	1132	1137	1053	1069	918	817	680	588	452
80	379	349	278	211	177	146	127	103	113	104
90	102	85	97	101	99	106	118	86	109	93
100	108	93	103	106	92	95	91	137	103	149
110	159	178	231	271	322	327	304	328	281	248
120	188	146	112	89	50	45	38	61	51	44
130	50	34	34	49	42	37	44	38	41	43
140	40	46	39	39	47	54	45	45	42	37
150	41	51	37	57	39	48	45	52	53	44
160	60	60	57	69	63	48	29	34	29	49
170	30	36	46	35	47	41	33	32	40	43
180	47	55	51	48	71	58	71	84	89	55
190	81	67	79	71	57	57	50	69	52	47
200	39	37	41	48	44	40	40	42	28	49
210	35	45	53	38	45	54	56	56	52	44
220	58	49	61	66	48	36	37	46	42	48
230	28	45	45	40	43	41	54	42	50	48
240	56	69	54	69	96	116	126	129	166	227
250	283	433	690	1035	1469	1803	1990	2059	1932	1585
260	1177	893	606	403	282	202	145	117	103	75
270	56	39	39	24	17	19	22	14	26	26
280	25	26	25	25	32	33	44	50	45	53
290	53	63	71	79	74	90	96	93	119	138
300	186	262	373	600	820	1142	1333	1528	1519	1565
310	1947	2697	4120	6243	8459	10311	11059	10385	8460	6054
320	3797	2156	1182	726	479	277	195	116	58	28
330	21	16	11	11	5	3	6	5	3	3
340	1	3	1	3	5	1	1	3	0	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, никеля, иридия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания никеля, иридия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов никеля и иридия.

Задание G21

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, алюминий, иридий.

Тормозящая среда: алюминий.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pt
2,0	Канал анализатора	114	168	258	437

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
30			9262	9069	8955	8648	8485	8400	7772	8001
40	7826	7506	7446	7295	7430	7136	6866	6810	6697	6639
50	6660	6611	6524	6223	6102	6123	6118	5988	6055	5815
60	5887	5734	5784	5612	5683	5665	5392	5558	5383	5427
70	5339	5311	5376	5222	5182	5138	5161	5178	5058	5101
80	5060	4857	4916	4870	4949	4891	4796	4850	4772	4719
90	4693	4642	4550	4671	4657	4649	4560	4591	4565	4624
100	4593	4673	4538	4429	4481	4640	4489	4484	4467	4561
110	4397	4376	4355	4366	4389	4366	4376	4453	4284	4390
120	4276	4410	4269	4240	4232	4097	4123	4129	4254	4190
130	4072	4061	4015	4253	4107	4141	4122	4110	4051	4048
140	4113	4006	3909	3912	3996	4084	3920	4058	4038	3976
150	3929	3978	3962	3956	3802	3902	3956	3888	3930	3988
160	3957	4127	4059	4289	4250	4355	4440	4164	4014	3926
170	3839	3703	3800	3775	3790	3700	3738	3735	3712	3571
180	3756	3644	3656	3723	3666	3650	3764	3580	3605	3760
190	3497	3516	3599	3733	3535	3650	3525	3525	3566	3461
200	3505	3570	3538	3491	3556	3557	3519	3518	3469	3535
210	3428	3505	3458	3453	3394	3457	3500	3492	3420	3325
220	3412	3331	3280	3433	3334	3462	3279	3256	3356	3340
230	3231	3395	3340	3462	3289	3282	3360	3291	3255	3203
240	3143	3160	3182	3221	3145	3122	3087	3107	3088	3081
250	2876	2686	2673	2402	2013	1603	1126	897	599	445
260	303	234	133	111	75	65	59	73	59	68
270	48	52	59	58	46	62	63	52	64	67
280	62	71	62	65	61	57	61	51	54	55
290	66	57	71	74	58	67	74	71	58	70
300	72	68	56	60	69	57	60	79	58	73
310	57	79	60	86	70	81	66	58	49	55
320	70	59	53	61	63	67	62	57	77	58
330	61	57	75	71	58	54	70	70	72	73
340	73	72	75	78	78	69	67	83	86	86
350	99	93	106	104	123	95	95	88	78	76
360	81	59	65	71	79	83	72	69	79	71
370	78	63	96	71	81	92	82	80	90	95
380	86	95	107	99	98	106	101	107	135	116
390	141	122	129	116	133	134	153	159	151	140
400	175	159	163	184	201	215	233	210	249	278
410	276	309	355	401	425	493	670	984	1553	2658
420	4199	5965	7422	8451	8207	6742	4579	2628	1032	412
430	139	50	35	28	25	29	27	27	17	15
440	9	8	8	4	3	4	1	2	2	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для алюминия, кислорода и иридия. Рассчитайте слоевые содержания иридия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов иридия в алюминии.

Задание G22

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, алюминий, платина.

Тормозящая среда: алюминий.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pt
2,0	Канал анализатора	114	168	258	437

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
50		7476	7468	7407	7092	7109	6796	6694	6745	6710
60	6582	6573	6314	6375	6295	6064	6042	5990	5944	5887
70	5719	5830	5586	5670	5471	5519	5673	5414	5388	5287
80	5314	5220	5186	5153	5110	4979	5087	4993	4930	4993
90	4956	4882	4761	4760	4746	4688	4732	4719	4717	4661
100	4621	4434	4718	4623	4510	4571	4503	4503	4602	4416
110	4468	4404	4442	4360	4288	4360	4273	4242	4222	4320
120	4306	4245	4092	4189	4127	4170	4197	4253	4152	4165
130	4163	4126	4144	4054	4034	3991	4116	4073	3910	3823
140	3967	3906	3879	3904	3960	3929	3998	3855	3817	3855
150	3800	3909	3894	3940	3715	3835	3878	3821	3770	3953
160	3853	3811	3868	3911	3939	3946	4050	3813	3836	3697
170	3749	3628	3572	3621	3636	3633	3661	3599	3456	3515
180	3593	3637	3602	3436	3449	3470	3553	3430	3606	3454
190	3433	3495	3377	3530	3376	3315	3447	3477	3487	3391
200	3474	3430	3287	3417	3362	3350	3344	3305	3414	3319
210	3283	3441	3288	3286	3257	3399	3284	3293	3259	3221
220	3205	3264	3214	3153	3245	3243	3225	3131	3272	3217
230	3227	3198	3173	3213	3195	3125	3090	3167	3200	3224
240	3202	3112	3110	3027	3036	3107	2970	2966	2993	2939
250	2945	2974	2762	2670	2451	2141	1718	1270	815	516
260	388	241	272	261	211	202	204	236	207	208
270	225	213	213	222	213	188	210	220	206	196
280	227	235	218	222	218	201	215	220	185	220
290	215	203	183	223	175	221	197	217	219	187
300	208	213	200	211	171	216	202	185	184	185
310	192	183	204	191	207	220	207	210	195	191
320	201	202	163	188	205	206	180	196	207	183
330	197	209	198	198	189	203	208	176	184	187
340	198	178	171	176	190	174	177	193	206	181
350	181	149	164	174	161	162	158	164	157	173
360	168	157	172	170	159	150	159	167	191	170

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
370	153	183	155	154	132	150	157	147	154	167
380	158	157	144	162	185	149	162	180	163	156
390	164	17	161	159	156	183	170	163	198	186
400	178	193	157	178	198	184	202	203	181	180
410	198	223	217	215	200	197	207	214	204	201
420	199	212	225	265	232	289	319	343	412	527
430	760	1400	2669	4540	7214	9305	9692	7728	4612	2038
440	654	190	52	25	10	8	7	5	9	3
450	0	4	2	3	3	3	3	0	0	6

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для алюминия, кислорода и платины. Рассчитайте слоевые содержания платины и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов платины в алюминии.

Задание G23

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, алюминий, цирконий.

Тормозящая среда: алюминий.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pt
2,0	Канал анализатора	114	168	258	437

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
70	5386	5438	5293	5377	5177	5112	5203	5005	5012	5024
80	5067	4855	4868	4940	4915	4867	4857	4824	4915	4852
90	4744	4748	4669	4656	4628	4690	4691	4578	4625	4655
100	4662	4473	4498	4631	4473	4522	4522	4436	4453	4461
110	4392	4360	4376	4505	4462	4348	4437	4368	4311	4341
120	4154	4346	4198	4218	4256	4160	4136	4171	4184	4224
130	4203	4272	4056	4259	3936	4151	4130	4062	4033	4021
140	3945	3952	4163	4018	3957	4047	3952	3991	4047	3960
150	3912	3961	4016	3879	4115	3970	4008	4021	3960	3896
160	3936	4023	4106	4076	4260	4369	4433	4266	4110	3917
170	3874	3748	3800	3861	3723	3613	3833	3876	3805	3732
180	3592	3735	3700	3813	3680	3686	3730	3754	3586	3726
190	3742	3700	3617	3735	3607	3618	3646	3682	3616	3687
200	3624	3554	3586	3590	3555	3561	3544	3523	3472	3573
210	3492	3420	3417	3565	3532	3498	3521	3478	3405	3411
220	3438	3462	3375	3417	3391	3390	3441	3383	3425	3438
230	3432	3355	3428	3413	3263	3372	3470	3365	3204	3407
240	3275	3247	3272	3263	3329	3314	3124	3247	3179	3100
250	3093	2922	2838	2804	2379	1882	1384	910	521	300

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
260	173	136	121	128	114	112	95	119	96	115
270	101	110	114	125	95	104	100	109	108	131
280	116	126	116	104	119	103	107	115	107	120
290	95	95	120	123	125	109	114	113	93	101
300	98	111	121	113	123	115	137	126	121	120
310	119	135	138	124	116	123	112	112	128	118
320	108	107	111	108	113	112	127	123	99	136
330	117	133	121	119	105	108	128	114	125	116
340	104	101	129	121	118	122	141	124	119	116
350	131	116	108	142	121	120	100	118	106	133
360	115	111	111	98	121	109	117	122	105	109
370	124	113	120	95	106	84	112	122	115	113
370	124	113	120	95	106	84	112	122	115	113
380	102	118	115	121	116	127	136	133	152	164
390	227	325	516	981	1687	2699	3366	3723	3242	2585
400	1615	918	423	208	84	25	8	6	14	6
410	9	18	16	10	8	8	11	8	9	11
420	2	9	3	10	11	6	10	10	14	7
430	11	22	31	32	39	45	36	31	18	13
440	3	3	0	0	0	2	1	1	3	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для алюминия, кислорода и циркония. Рассчитайте слоевые содержания циркония и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов циркония в алюминии.

Задание G24

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, медь, платина.

Тормозящая среда: медь.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pt
2,0	Канал анализатора	114	168	258	437

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
50	15074	14583	14564	14157	14110	13754	13607	13502	13154	13199
60	13010	12794	12627	12345	12243	12227	11807	11801	11601	11278
70	11248	11227	11141	10936	10953	10480	10553	10468	10361	10275
80	10028	10236	9671	9929	9698	9877	9486	9461	9235	9279
90	9170	9314	9187	9137	8870	8960	8706	8685	8719	8725
100	8497	8714	8488	8428	8373	8438	8187	8208	8159	8048
110	7894	8088	8003	7877	7761	7796	7741	7857	7708	7634

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
120	7458	7402	7382	7272	7345	7273	7229	7075	7222	7132
130	7190	7000	7151	6830	6883	6929	6779	6789	6721	6548
140	6500	6574	6497	6765	6698	6629	6446	6590	6378	6365
150	6181	6341	6185	6212	6350	6333	6249	6232	6273	6223
160	6169	6054	6001	5870	5967	5957	5883	5996	5945	5890
170	5789	5769	5778	5657	5746	5853	5811	5689	5835	5774
180	5681	5664	5561	5609	5369	5515	5583	5585	5408	5641
190	5413	5397	5216	5306	5332	5306	5282	5425	5158	5322
200	5285	5333	5180	5156	5290	5207	5088	5124	4991	5062
210	5037	5181	5049	5149	5039	4934	4987	5061	4833	4921
220	4928	4887	4924	4881	4821	4782	4893	4809	4836	4812
230	4795	4796	4768	4639	4670	4672	4772	4529	4518	4567
240	4767	4635	4651	4637	4609	4604	4548	4511	4527	4401
250	4482	4440	4431	4557	4516	4376	4411	4445	4428	4375
260	4313	4441	4391	4454	4298	4312	4334	4389	4241	4213
270	4295	4329	4187	4311	4196	4279	4226	4305	4179	4269
280	4167	4078	4188	4129	4098	4035	4129	4044	4241	3983
290	3976	4139	3973	4079	3998	4080	4113	4003	3893	3995
300	3991	3865	3944	4050	3855	3853	3827	3869	3932	3931
310	3835	3847	3870	3858	3898	3760	3807	3888	3693	3759
320	3947	3769	3680	3685	3810	3743	3707	3688	3590	3666
330	3726	3664	3726	3698	3607	3650	3616	3637	3556	3633
340	3582	3563	3595	3521	3649	3455	3380	3582	3506	3520
350	3449	3514	3474	3501	3412	3295	3309	3284	3242	3285
360	3320	3264	3062	2817	2679	2412	1937	1543	1205	843
370	544	332	221	160	105	85	90	72	65	63
380	67	73	68	86	65	68	54	70	64	65
390	59	74	55	59	69	57	71	57	71	58
400	62	55	62	79	69	70	73	86	78	83
410	58	79	75	72	79	69	84	95	91	100
420	71	99	115	117	121	149	160	188	199	229
430	296	381	607	788	1246	1836	2218	2275	2098	1485
440	936	506	230	121	58	27	25	21	12	27
450	13	8	14	13	14	13	8	7	13	6

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для меди, кислорода и платины. Рассчитайте слоевые содержания платины и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов платины и кислорода.

Задание G25

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, кремний, титан, железо.

Тормозящая среда: кремний.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	193	324

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
60	6169	6241	6204	6079	5976	5904	5858	5866	5692	5815
70	5721	5747	5557	5604	5614	5538	5498	5431	5415	5258
80	5349	5172	5336	5360	5338	5244	5052	5073	4855	5133
90	4957	5098	5032	5013	4962	4976	4815	4860	4819	4801
100	5007	4895	4893	4850	4838	4630	4795	4919	4836	4749
110	4728	4722	4691	4842	4679	4903	4908	5047	4955	4992
120	5013	5178	5074	4671	4760	4715	4437	4477	4452	4429
130	4352	4445	4227	4328	4459	4311	4320	4156	4343	4247
140	4254	4164	4149	4239	4256	4141	4202	4165	4167	4130
150	4121	4200	4008	4087	4079	4146	4082	4099	3872	4011
160	3969	3964	3851	3889	3908	3799	3852	3890	3863	3766
170	3689	3761	3808	3677	3548	3461	3221	2863	2208	1674
180	1146	827	575	430	370	286	256	237	252	218
190	214	237	208	217	249	199	214	204	205	216
200	205	214	162	219	209	190	209	187	223	228
210	236	252	236	233	260	271	286	244	298	266
220	323	282	314	330	307	355	405	508	651	856
230	1111	1610	2253	2930	3700	4270	4667	4940	4883	4904
240	4286	3820	3054	2324	1740	1245	889	769	639	656
250	661	887	1079	1441	2078	2749	3452	3969	4332	4634
260	4666	4569	4011	3322	2287	1462	764	386	206	105
270	63	48	31	31	21	20	12	14	14	13
280	18	12	10	11	13	21	17	23	21	25
290	27	28	23	19	12	10	5	10	8	6
300	6	4	12	5	5	2	7	10	5	3
310	3	5	1	3	2	4	9	10	7	5

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для кремния, титана, железа и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания титана, железа и кислорода. Определите толщину слоев, содержащих титан, железо и кислород.

Задание G26

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, кобальт, платина.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	193	324

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
20			5053	4431	3747	3381	2960	2753	2555	2438
30	2419	2218	2206	2269	2175	2055	2071	2049	1932	1932
40	1951	1790	1834	1858	1746	1775	1754	1691	1665	1702
50	1552	1543	1498	1589	1465	1561	1469	1460	1472	1430
60	1407	1448	1382	1326	1364	1354	1289	1324	1311	1344
70	1272	1258	1252	1195	1142	989	904	805	704	630
80	533	471	350	294	300	242	263	220	190	199
90	218	207	206	201	194	201	212	179	187	176
100	182	173	194	183	182	192	192	198	205	206
110	208	240	263	271	289	299	326	266	291	268
120	287	253	239	224	221	160	167	160	164	158
130	163	177	193	182	166	177	156	150	178	166
140	131	187	164	182	204	169	179	154	170	160
150	157	180	172	192	169	196	180	208	193	184
160	148	201	206	202	210	173	184	178	208	188
170	171	197	181	187	200	194	180	214	180	216
180	225	200	232	234	243	241	254	251	230	257
190	239	220	194	223	243	240	237	227	272	233
200	246	233	241	223	216	229	287	259	266	256
210	280	250	262	242	249	278	269	293	285	304
220	312	315	298	306	301	328	317	303	332	325
230	300	337	324	350	336	342	370	411	350	366
240	391	422	399	384	403	466	509	468	526	575
250	606	666	728	875	1190	1688	2465	3507	4537	5318
260	5852	5264	4443	3184	2080	1224	666	405	250	205
270	173	142	150	131	139	126	117	133	132	120
280	117	134	131	142	131	145	136	146	168	147
290	158	166	177	192	178	220	226	227	258	341
300	360	415	579	800	1222	1702	2456	3336	4489	5536
310	6227	6281	5606	4692	3246	2030	1177	651	326	224
320	124	69	42	23	22	7	1	2	1	2
330	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, кобальта, платины и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания кобальта, платины и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов кобальта и платины.

Задание G27

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, кобальт, иридий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	193	324

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
30	2142	2042	2024	1915	1944	1883	1828	1754	1750	1782
40	1728	1783	1665	1581	1623	1602	1620	1535	1464	1473
50	1464	1401	1411	1389	1378	1407	1350	1296	1333	1339
60	1235	1315	1272	1220	1250	1239	1157	1238	1225	1158
70	1155	1050	1099	1014	1021	867	722	677	521	437
80	366	326	348	319	297	277	214	212	223	226
90	185	171	168	186	184	177	177	153	163	182
100	170	184	177	183	185	172	201	216	205	228
110	269	296	330	387	430	379	405	342	289	228
120	240	214	192	172	136	82	71	55	57	49
130	49	51	39	33	53	45	58	45	74	57
140	54	46	67	55	47	55	59	58	40	67
150	57	55	46	56	58	59	58	53	82	62
160	79	60	57	71	66	58	52	49	66	55
170	44	43	57	55	63	55	57	54	61	67
180	50	53	69	52	63	77	64	73	63	56
190	83	73	84	86	94	75	74	73	74	71
200	76	55	72	56	68	65	64	67	62	73
210	60	80	75	68	78	86	87	97	93	118
220	110	111	97	93	93	88	82	91	113	105
230	81	95	105	118	95	121	104	115	131	125
240	140	153	145	138	165	175	200	226	233	270
250	333	450	602	840	1300	2075	2845	3764	4256	4750
260	4806	4143	3092	2159	1302	691	330	165	90	58
270	60	51	36	49	26	26	24	21	18	21
280	24	11	19	19	16	27	28	21	28	41
290	51	45	52	61	60	85	69	86	89	72
300	83	87	128	141	189	323	450	677	932	1071
310	1249	1248	1314	1577	2330	3732	5806	8264	10343	11027
320	10464	8496	5798	3466	1709	717	261	77	21	6
330	2	1	1	2	0	0	1	1	0	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, кобальта, иридия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания кобальта, иридия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов кобальта и иридия.

Задание G28

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, никель, платина.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	193	324

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
20			2662	2618	2432	2421	2277	2358	2191	2211
30	2127	2119	2044	1903	1904	1879	1829	1800	1756	1751
40	1747	1618	1638	1512	1658	1535	1565	1494	1490	1510
50	1450	1435	1404	1435	1340	1362	1359	1291	1280	1265
60	1335	1213	1248	1275	1234	1218	1216	1183	1183	1174
70	1148	1148	1183	1110	1061	971	967	834	777	641
80	631	543	482	389	340	270	216	225	203	166
90	184	173	179	159	157	176	158	155	164	180
100	167	162	153	156	159	153	162	153	151	144
110	161	180	209	230	229	255	253	222	231	216
120	209	205	194	140	148	127	149	123	141	120
130	127	143	136	129	108	132	131	142	112	138
140	127	128	136	100	136	120	124	108	135	114
150	123	132	140	140	124	130	129	126	125	117
160	127	128	117	118	134	124	132	144	129	131
170	129	129	113	119	138	127	118	142	139	141
180	133	132	142	168	164	179	191	170	187	171
190	194	162	195	169	163	157	162	154	146	151
200	152	154	163	161	156	156	145	125	142	136
210	147	167	167	158	182	160	172	165	161	155
220	166	166	176	183	168	195	154	171	173	194
230	146	176	178	163	181	210	173	189	199	201
240	204	213	216	214	216	241	208	230	231	215
250	242	269	301	327	332	420	574	909	1284	1856
260	2494	3047	3254	3101	2515	2042	1439	962	604	395
270	283	222	151	164	140	114	128	131	125	141
280	138	136	145	154	135	143	153	142	136	142
290	139	128	180	142	171	157	163	196	190	203
300	189	231	271	292	368	490	691	1085	1607	2256
310	3316	4474	5705	6514	7080	7166	6421	5184	3752	2366
320	1351	669	257	108	40	21	4	2	1	0
330	2	0	0	0	0	1	2	3	0	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, никеля, платины и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания никеля, платины и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов никеля и платины.

Задание G29

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, серебро, иридий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	193	324

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
20				3273	2906	2658	2553	2481	2424	2271
30	2265	2250	2183	2116	2138	1957	1999	1965	1882	1903
40	1828	1862	1777	1754	1698	1672	1658	1681	1648	1602
50	1600	1626	1537	1478	1496	1404	1402	1453	1417	1387
60	1290	1323	1370	1411	1269	1315	1326	1204	1291	1207
70	1200	1239	1194	1172	1106	1110	1048	936	819	640
80	559	443	394	302	247	209	150	154	140	130
90	141	110	142	97	113	114	120	100	102	134
100	110	130	112	126	101	107	119	117	123	138
110	124	147	166	192	200	255	303	306	305	267
120	223	152	166	109	83	70	67	72	71	65
130	58	63	55	64	61	69	61	55	51	75
140	69	66	57	54	58	46	63	65	75	58
150	57	49	50	60	57	60	52	59	58	86
160	80	70	86	87	92	85	77	84	61	59
170	65	66	56	60	53	56	50	59	46	63
180	57	67	58	67	69	57	56	90	92	97
190	92	89	65	75	74	66	61	42	66	61
200	64	74	57	73	62	54	61	55	47	54
210	61	55	86	85	101	118	120	143	99	85
220	77	95	94	75	86	79	74	49	64	48
230	43	60	43	34	40	36	46	41	34	39
240	53	45	56	44	50	48	40	59	50	37
250	55	56	66	58	58	58	71	88	60	76
260	72	57	75	70	95	100	97	75	95	73
270	67	55	61	63	53	61	55	71	59	71
280	67	80	83	110	127	134	181	221	254	280
290	415	548	870	1413	1943	2612	3055	3073	2676	2069
300	1554	1186	1055	1106	1262	1403	1453	1442	1619	1954
310	2911	4283	6390	8654	10355	10689	10046	7827	5449	3364
320	1958	995	657	382	281	174	98	68	22	8
330	3	5	1	0	0	0	1	1	2	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, серебра, иридия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания серебра, иридия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов серебра и иридия.

Задание G30

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, серебро, платина.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	193	324

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
20			3268	3206	2911	2766	2560	2519	2431	2328
30	2229	2191	2125	2098	2031	2016	1976	1946	1895	1884
40	1844	1752	1782	1699	1688	1690	1665	1668	1609	1579
50	1564	1525	1449	1480	1454	1531	1449	1397	1369	1366
60	1341	1384	1285	1253	1259	1297	1283	1252	1280	1246
70	1207	1177	1163	1157	1125	1076	1075	994	934	825
80	815	629	534	415	324	217	172	133	133	137
90	116	98	102	104	112	114	100	115	107	109
100	112	98	113	91	90	90	105	85	85	99
110	102	116	145	143	186	205	219	206	210	174
120	172	125	113	90	72	57	52	41	52	39
130	38	39	37	47	38	49	41	45	41	46
140	42	55	43	54	53	32	48	44	43	48
150	57	38	50	36	49	52	40	38	46	45
160	38	53	45	53	62	62	55	66	40	62
170	40	59	37	44	53	39	50	48	47	35
180	46	59	48	67	68	70	76	86	95	94
190	93	89	77	80	60	54	60	58	54	55
200	68	65	60	61	73	73	85	75	74	64
210	72	61	86	97	110	133	132	147	115	107
220	94	74	89	65	53	52	48	42	27	25
230	22	19	16	14	23	20	14	11	17	13
240	14	16	21	14	19	20	16	13	12	17
250	25	19	18	20	24	21	17	24	26	24
260	18	23	19	23	10	15	15	22	19	19
270	18	34	22	25	16	27	36	42	38	45
280	44	41	62	56	87	92	109	157	206	293
290	346	534	812	1148	1721	2469	3136	3549	3699	3276
300	2524	1676	1031	582	397	271	282	332	411	558
310	674	952	1360	1710	2091	2444	2571	2435	2131	1492
320	1115	654	393	219	123	75	49	29	19	8
330	15	7	2	3	5	3	1	1	1	3
340	0	0	1	3	0	2	1	2	0	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, серебра, платины и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания серебра, платины и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов серебра и платины.

Задание G31

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, титан, платина.

Тормозящая среда: титан

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Si	Pt
1,3	Канал анализатора	101	149	239	405

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
50	6710	6521	6643	6632	6567	6444	6183	6251	6110	6168
60	6067	5947	5959	6036	5952	5753	5729	5724	5659	5715
70	5572	5578	5448	5465	5359	5415	5294	5412	5422	5384
80	5359	5199	5261	5291	5365	5121	5178	5238	5229	5195
90	5129	5140	5035	5030	4836	4881	4758	4731	4676	4666
100	4583	4552	4504	4437	4493	4520	4334	4436	4326	4415
110	4391	4303	4242	4218	4259	4279	4148	4190	4288	4358
120	4226	4007	4064	4173	4053	4154	4086	4105	4073	4038
130	3932	4004	3971	3934	3829	3933	4013	3838	3771	3811
140	3860	3700	3676	3764	3724	3720	3700	3619	3601	3643
150	3525	3544	3596	3537	3603	3501	3508	3501	3479	3541
160	3437	3509	3411	3512	3385	3397	3368	3394	3387	3386
170	3414	3243	3260	3237	3200	3245	3168	3213	3216	3224
180	3176	3166	3151	3251	3194	3116	3190	3122	3095	3084
190	3107	3238	3068	3126	3081	3124	2968	3016	3044	3117
200	3074	3053	3113	3002	2925	2973	2938	2994	2883	2994
210	2921	2858	2888	2904	2927	2858	2901	2908	2850	2831
220	2884	2815	2861	2860	2824	2806	2829	2857	2749	2761
230	2810	2843	2768	2791	2733	2664	2652	2665	2664	2817
240	2744	2686	2650	2653	2713	2574	2609	2613	2614	2612
250	2638	2582	2547	2526	2563	2587	2548	2456	2481	2472
260	2530	2445	2480	2429	2422	2357	2303	2290	2307	2252
270	2345	2260	2248	2220	2174	2085	2015	1907	1746	1761
280	1626	1492	1382	1219	1118	908	824	654	541	475
290	387	328	302	232	219	156	184	136	160	131
300	142	128	150	127	125	133	111	119	124	122
310	117	119	114	128	123	128	100	116	121	114
320	122	107	128	112	123	133	90	105	97	119
330	96	95	125	119	115	136	131	113	110	106
340	98	118	124	118	134	136	135	115	123	139
350	149	126	160	159	165	187	166	201	193	197
360	202	218	247	243	270	271	326	339	430	420
370	492	539	636	813	882	1011	1158	1392	1543	1771
380	1951	2229	2334	2578	2802	2984	3126	3355	3651	3856
390	4058	4084	4218	4266	4524	4640	4672	4654	4553	4543
400	4273	4048	3600	3181	2692	2044	1534	1160	807	519
410	333	206	121	109	78	64	67	52	50	52
420	58	49	45	48	45	47	43	36	47	39

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
430	36	35	34	36	39	27	25	26	39	27
440	31	27	31	33	29	23	27	25	28	25
450	24	30	23	41	25	25	27	22	23	18
460	22	30	25	27	23	24	26	26	21	32
470	25	24	28	23	33	19	23	20	37	29
480	27	36	30	25	30	35	38	41	24	36
490	30	29	40	23	27	47	32	48	38	41
500	71	93	87	81	72	80	59	43	22	23
510	13	9								

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для титана, платины, углерода и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания платины, углерода и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов платины.

Задание G32

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, алюминий, цирконий.

Тормозящая среда: алюминий

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Si	Pt
1,3	Канал анализатора	101	149	239	405

Распечатка спектра обратного рассеяния:

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
50	6163	6327	6156	6258	6157	6101	6004	6087	5896	5651
60	5769	5641	5647	5593	5514	5579	5540	5380	5315	5360
70	5255	5342	5260	5188	5228	5348	5273	5243	5320	4994
80	5341	5257	5353	5275	5378	5457	5235	5336	5365	5271
90	5367	5156	5165	5190	5098	4950	4903	4901	4591	4624
100	4461	4607	4395	4401	4293	4382	4257	4258	4267	4232
110	4222	4267	4261	4256	4173	4247	4243	4189	4150	4140
120	4206	4112	4057	4223	4266	4230	4214	4306	4182	4205
130	4172	4180	4181	4077	4059	4036	3948	4114	4014	3972
140	3995	3943	3889	3923	3815	3703	3767	3708	3655	3521
150	3587	3569	3547	3604	3502	3618	3635	3514	3541	3649
160	3512	3521	3415	3524	3346	3425	3271	3443	3493	3283
170	3319	3369	3286	3312	3298	3296	3303	3286	3258	3299
180	3148	3234	3043	3279	3152	3171	3106	3243	3064	3084
190	3077	3020	3035	2966	2950	2969	2875	2848	2797	2744
200	2707	2527	2472	2348	2134	2042	1863	1724	1488	1298
210	1088	950	812	639	521	473	356	273	228	180
220	173	151	139	142	147	126	104	96	92	96

Номер канала	Выход рассеяния, имп.									
230	105	88	84	82	74	65	65	62	73	68
240	69	76	75	70	57	60	68	72	62	72
250	51	66	70	58	56	51	71	69	84	57
260	54	56	53	56	45	57	61	58	48	49
270	55	53	51	42	42	57	46	52	54	46
280	46	48	43	53	50	58	50	50	45	50
290	61	45	40	47	52	49	57	49	47	44
300	37	37	38	42	31	44	33	37	30	45
310	37	35	30	31	35	24	35	37	30	32
320	31	41	34	35	40	43	51	34	39	45
330	52	43	66	69	91	107	112	156	225	211
340	294	294	387	386	507	588	650	745	754	773
350	795	811	895	917	946	952	948	968	963	969
360	998	932	865	806	803	672	554	474	354	230
370	160	126	76	46	30	21	9	13	9	10
380	8	7	10	10	7	7	5	7	4	4
390	6	2	8	5	6	4	3	2	6	8
400	5	6	1	0	2	1	4	2	1	3

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для алюминия, циркония, углерода и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания циркония, углерода и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов циркония.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Основные единицы измерений Международной системы СИ (СИ)

Измеряемая величина	Символическое обозначение		Наименование единицы	Обозначение		Определение единицы измерения
	величины	размерности		русское	международное	
Длина	l	L	метр	м	m	1 м равен 1 650 763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома ^{86}Kr
Масса	m	M	килограмм	кг	kg	1 кг равен массе международного прототипа килограмма (массе платино-иридиевого эталона)
Время	t	T	секунда	с	s	1 с равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома $^{133}_{55}\text{Cs}$
Сила электрического тока	I	I	ампёр	A	A	1 A равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам (бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения), расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной в 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н
Температура термодинамическая	T	Θ	кельвин	K	K	1 K равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды (соответствует равновесному сосуществованию трех фаз – жидкой, твердой (лед) и газообразной (насыщенный пар)), достигаемой при температуре, равной $0,01^\circ\text{C} = 273,16$ K

Окончание прил. 1

Измеряемая величина	Символическое обозначение		Наименование единицы	Обозначение		Определение единицы измерения
	величины	размерности		русское	международное	
Количество вещества	n	N	моль	моль	mol	1 моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в изотопе углерода $^{12}_6\text{C}$ массой 0,012 кг (структурные элементы могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц)
Сила света	I_v	J	кандела	кд	kd	1 кд равна силе света (в заданном направлении) источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср
Плоский угол	—	—	радиан	рад	rad	1 рад равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу
Телесный угол	—	—	стерадиан	ср	sr	1 ср равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равновеликой радиусу сферы

ПРИЛОЖЕНИЕ 2**Некоторые производные единицы СИ**

Измеряемая величина	Наименование единицы	Обозначение	
		русское	международное
Частота	герц	Гц	Hz
Сила	ньютон	Н	N
Давление, механическое напряжение	паскаль	Па	Pa
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	Дж	J
Мощность, тепловой поток, поток излучения	ватт	Вт	W
Количество электричества, поток электрического смещения	кулон	Кл	C
Электрическое напряжение, потенциал, электродвижущая сила	вольт	В	V
Электрическая емкость	фарад	Ф	F
Электрическое сопротивление	ом	Ом	Ω
Электрическая проводимость	сименс	См	S
Индукция магнитного поля	тесла	Тл	T
Поток магнитной индукции	вебер	Вб	Wb
Индуктивность	генри	Гн	H
Световой поток	люмен	лм	lm
Освещенность	люкс	лк	lx
Поглощенная доза ионизирующего излучения	грэй	Гр	Gy
Эквивалентная доза излучения	зиверт	Зв	Sv
Активность радионуклида	беккерель	Бк	Bq

Единицы измерения, допускаемые к применению в специальных областях

Наименование величины	Наименование единицы	Обозначение		Связь с единицей СИ	Область применения
		русское	международное		
Длина	астрономическая единица	а. е.	AE	1 а. е. = $1,495\,58 \cdot 10^{11}$ м	Астрономия
	световой год	с. г.	ly	1 с. г. = $9,4605 \cdot 10^{15}$ м	
	парсек	пк	pc	1 пк = $3,0857 \cdot 10^{16}$ м	
Площадь	ферми		Fe	1 Fe = $1 \cdot 10^{-15}$ м	Ядерная физика
	гектар	га	ha	1 га = $1 \cdot 10^4$ м ²	
	гон		gon	1 гон = $(\pi / 200)$ рад	
Плоский угол					Геодезия
Масса	атомная единица массы	а. е. м.	u	1 а. е. м. = $1,660\,57 \cdot 10^{-27}$ кг	Ядерная физика
Тонкость	текс	текс	tex	1 текс = $1 \cdot 10^{-6}$ кг·м ⁻¹	Текстильное производство
Энергия	электронвольт	эВ	eV	1 эВ = $1,602\,19 \cdot 10^{-19}$ Дж	Ядерная физика
	ридберг		Ry	1 Ry = $2,1796 \cdot 10^{-18}$ Дж	Атомная физика
Оптическая сила	диоптрия	дптр	dpt	1 дптр = 1 м ⁻¹	Оптика

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Применявшиеся ранее единицы измерения ряда физических величин

Наименование величины	Наименование единицы	Обозначение		Связь с единицей СИ
		русское	между- народное	
Длина	ангстрём	Å		$1 \text{ Å} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
	единица Х	ХЕ		$1 \text{ ХЕ} = 1,002\,06 \cdot 10^{-13} \text{ м}$
Объем	литр	л	l	$1 \text{ л} = 1 \text{ дм}^3 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
Сечение взаимодействия	барн	барн	b	$1 \text{ б} = 1 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$
Скорость	кнот	kn		$1 \text{ kn} = 0,514\,444 \text{ м/с}$
Ускорение	гал	гал	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$
Масса	карат	карат	k	$1 \text{ к} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$
Сила	понд	p		$1 \text{ p} = 9,806\,65 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$
	дина	дин	dyn	$1 \text{ dyn} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$
Давление	бар	бар	bar	$1 \text{ bar} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$
	физическая атмосфера	атм	atm	$1 \text{ атм} = 1,013\,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$
	техническая атмосфера	ат	at	$1 \text{ ат} = 9,806\,65 \cdot 10^4 \text{ Па}$
	миллиметр ртутного столба	мм рт. ст., Торр	Torr	$1 \text{ Торр} = 133,322 \text{ Па}$
	миллиметр водяного столба	mm WS		$1 \text{ mm WS} = 9,806\,65 \text{ Па}$
Механическое напряжение	килопонд на квадратный миллиметр	kp/mm ²		$1 \text{ kp/mm}^2 = 9,806\,65 \cdot 10^6 \text{ Па}$
Динамическая вязкость	пуаз	П	P	$1 \text{ P} = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$
Кинематическая вязкость	стокс	Ст	St	$1 \text{ Ст} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$
Работа, энергия	эрг	эрг	erg	$1 \text{ эрг} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$
Количество теплоты	калория	кал	cal	$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ Дж}$
Индукция магнитного поля	гаусс	Гс	Gs	$1 \text{ Гс} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$
Напряженность магнитного поля	эрстед	Э	Oe	$1 \text{ Ое} = 1 / (4\pi) \cdot 10^3 \text{ А/м} =$ $= 79,5775 \text{ А/м}$

Наименование величины	Наименование единицы	Обозначение		Связь с единицей СИ
		русское	между- народное	
Поток магнитной индукции	ма́ксвелл	Мкс	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Вб}$
Яркость	нит	нт	nt	$1 \text{ nt} = 1 \text{ кд/м}^2$
	стильб	сб	sb	$1 \text{ sb} = 1 \cdot 10^4 \text{ кд/м}^2$
	ла́мберт	Лб	Lb	$1 \text{ Lb} = 10^4/\pi \text{ кд/м}^2 =$ $= 3,18 \cdot 10^3 \text{ кд/м}^2$
Сила света	свеча	—	—	$1 \text{ св} = 1 \text{ кд}$
Освещенность	фот	ф	ph	$1 \text{ ph} = 1 \cdot 10^4 \text{ лк}$
Экспозиционная доза	рентген	P	R	$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$
Поглощенная доза	рад	рад	rd	$1 \text{ rd} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}$
Активность радионуклида	кюри	Ки	Ci	$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$

ПРИЛОЖЕНИЕ 5**Обозначения кратностей и долей единиц измерения**

Кратность или часть единицы		Символическое обозначение	
численное значение	название приставки	русское	международное
10^{18}	экса	Э	E
10^{15}	пета	П	P
10^{12}	тера	Т	T
10^9	гига	Г	G
10^6	мега	М	M
10^3	кило	к	k
10^2	гекто	г	h
10^1	дека	да	da
10^{-1}	деци	д	d
10^{-2}	санти	с	c
10^{-3}	милли	м	m
10^{-6}	микро	мк	μ
10^{-9}	нано	н	n
10^{-12}	пико	п	p
10^{-15}	фемто	ф	f
10^{-18}	атто	а	a

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Основные характеристики источников света и потоков электромагнитного излучения

Величина	Определение	Единица СИ	
		наименование	обозначение
Поток излучения (лучистый поток)	Средняя мощность излучения за время, значительно большее периода электромагнитных колебаний; характеризуется количеством энергии, переносимой электромагнитной волной в единицу времени через какую-либо поверхность	ватт	Вт
Редуцированный поток излучения	Поток излучения, оцениваемый по действию, вызванному излучением на спектрально-избирательный приемник	ватт	Вт
Световой поток	Поток излучения, оцениваемый по действию оптического излучения на нормальный (светоадаптированный) человеческий глаз. Величина светового потока пропорциональна редуцированному световому потоку; коэффициент пропорциональности, называемый спектральной световой эффективностью, равен 683 лм/Вт при длине волны 555 нм	люмен	лм
Световая отдача	Отношение излучаемого источником светового потока к потребляемой им мощности; характеристика экономичности источника света	люмен на ватт	лм/Вт
Световая энергия	Произведение светового потока на длительность освещения	люмен-секунда	лм-с
Сила света	Отношение светового потока, распространяющегося от источника внутри элементарного телесного угла, содержащего данное направление, к этому телесному углу; величина, характеризующая свечение источника видимого излучения в некотором направлении	кандэла	кд
Энергетическая сила света (сила излучения)	Отношение потока излучения, распространяющегося от источника внутри элементарного телесного угла, содержащего данное направление, к этому телесному углу	ватт на стерадиан	Вт/ср
Светимость	Отношение светового потока, исходящего от элемента поверхности, к площади этого элемента	люмен с квадратного метра	лм/м ²

Окончание прил. 6

Величина	Определение	Единица СИ	
		наименование	обозначение
Энергетическая светимость	Энергия излучения, испускаемая в единицу времени единицей поверхностью источника	ватт с квадратного метра	Вт/м ²
Освещение	Интеграл от силы света импульсного источника по времени в пределах рассматриваемого интервала времени	кандела-секунда	кд·с
Энергетическое освечение	Интеграл от энергетической силы света импульсного источника по времени в пределах рассматриваемого интервала времени	джоуль на стерадиан	Дж/ср
Освещенность	Отношение светового потока, падающего на элемент поверхности, к площади этого элемента	люкс	лк
Энергетическая освещенность	Поток излучения, падающий на единицу облучаемой поверхности	ватт на квадратный метр	Вт/м ²
Яркость	Поверхностно-пространственная плотность светового потока, исходящего от поверхности источника, равная отношению силы света элемента поверхности к площади проекции этого элемента, перпендикулярной рассматриваемому направлению	кандела на квадратный метр	кд/м ²
Энергетическая яркость	Поверхностно-пространственная плотность потока излучения, исходящего от поверхности источника, равная отношению силы света элемента поверхности к площади проекции этого элемента, перпендикулярной рассматриваемому направлению	ватт на стерадиан и на квадратный метр	Вт/(ср·м ²)
Экспозиция	Произведение освещенности на длительность освещения	люкс-секунда	лк·с
Энергетическая экспозиция	Отношение световой энергии, падающей на элемент поверхности, к площади этого элемента	джоуль на квадратный метр	Дж/м ²

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Энергии квантов и длины волн K_{α} -излучения атомов элементов

Элемент	Z	Энергия кванта, кэВ	Длина волны, Å	
			$K_{\alpha 2}$	$K_{\alpha 1}$
Li	3	0,05	228	
Be	4	0,11	114	
B	5	0,18	67,6	
C	6	0,28	44,7	
N	7	0,39	31,6	
O	8	0,52	23,62	
F	9	0,68	18,32	
Ne	10	0,85	14,610	
Na	11	1,04	11 910 1	
Mg	12	1,25	9 890 0	
Al	13	1,49	8 341 73	8 339 34
Si	14	1,74	7 127 91	7 125 42
P	15	2,01	6 160	6 157
S	16	2,31	5 374 96	5 372 16
Cl	17	2,62	4 730 7	4 727 8
Ar	18	2,96	4 194 74	4 191 80
K	19	3,31	3 744 5	3 741 4
Ca	20	3,69	3 361 66	3 358 39
Sc	21	4,09	3 034 2	3 030 9
Ti	22	4,51	2 752 16	2 748 51
V	23	4,95	2 507 38	2 503 56
Cr	24	5,41	2 293 606	2 289 70
Mn	25	5,90	2 105 78	2 101 820
Fe	26	6,40	1 939 980	1 936 042
Co	27	6,93	1 792 850	1 788 965
Ni	28	7,47	1 661 747	1 657 910
Cu	29	8,04	1 544 390	1 540 562
Zn	30	8,63	1 439 000	1 435 155
Ga	31	9,24	1 343 99	1 340 083
Ge	32	9,88	1 258 011	1 254 054
As	33	10,53	1 179 87	1 175 88
Se	34	11,21	1 108 82	1 104 77
Br	35	11,91	1 043 82	1 039 74
Kr	36	12,63	0 984 1	0 980 1
Rb	37	13,38	0 929 69	0 925 553
Sr	38	14,14	0 879 43	0 875 26
Y	39	14,93	0 833 05	0 828 84
Zr	40	15,75	0 790 15	0 785 93
Nb	41	16,58	0 750 44	0 746 20
Mo	42	17,44	0 713 590	0 709 300
Tc	43	18,33	0 679 32	0 675 02
Ru	44	19,24	0 647 408	0 643 083
Rh	45	20,17	0 617 630	0 613 279

Элемент	Z	Энергия кванта, кэВ	Длина волны, Å	
			$K_{\alpha 2}$	$K_{\alpha 1}$
Pd	46	21,12	0,589 821	0,585 448
Ag	47	22,11	0,563 798	0,559 407 5
Cd	48	23,11	0,539 422	0,535 010
In	49	24,14	0,516 544	0,512 113
Sn	50	25,20	0,495 053	0,490 559
Sb	51	26,28	0,474 827	0,470 354
Te	52	27,38	0,455 784	0,451 295
I	53	28,51	0,437 829	0,433 318
Xe	54	29,67	0,420 87	0,416 34
Cs	55	30,86	0,404 835	0,400 290
Ba	56	32,07	0,389 668	0,385 111
La	57	33,31	0,375 313	0,370 737
Ce	58	34,57	0,361 683	0,357 092
Pr	59	35,87	0,348 749	0,344 140
Nd	60	37,19	0,336 472	0,331 846
Pm	61	38,54	0,324 803	0,320 160
Sm	62	39,92	0,313 698	0,309 040
Eu	63	41,33	0,303 118	0,298 446
Gd	64	42,77	0,293 038	0,288 353
Tb	65	44,24	0,283 423	0,278 724
Dy	66	45,73	0,274 247	0,269 533
Ho	67	47,26	0,265 486	0,260 756
Er	68	48,83	0,257 110	0,252 365
Tm	69	50,42	0,249 095	0,244 338
Yb	70	52,04	0,241 424	0,236 655
Lu	71	53,70	0,234 081	0,229 298
Hf	72	55,40	0,227 024	0,222 227
Ta	73	57,11	0,220 305	0,215 497
W	74	58,87	0,213 828	0,209 010
Re	75	60,67	0,207 611	0,202 781
Os	76	62,50	0,201 639	0,196 794
Ir	77	64,36	0,195 904	0,191 047
Pt	78	66,26	0,190 381	0,185 511
Au	79	68,20	0,185 075	0,180 195
Hg	80	70,18	0,179 958	0,175 068
Tl	81	72,19	0,175 036	0,170 136
Pb	82	74,25	0,170 294	0,165 376
Bi	83	76,34	0,165 717	0,160 789
Po	84	78,48	0,161 30	0,156 36
At	85	80,66	0,157 05	0,152 10
Rn	86	82,88	0,152 94	0,147 98
Fr	87	85,14	0,148 96	0,143 99
Ra	88	87,46	0,145 12	0,140 14
Ac	89	89,81	0,141 41	0,136 417
Th	90	92,22	0,137 829	0,132 813
Pa	91	94,67	0,134 343	0,129 325
U	92	97,18	0,130 968	0,125 947

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Положение спектральных линий при анализе веществ методом РФС (шкала энергий связи), эВ

Элемент		Фотоэлектронные линии							Оже-линии		
		1s _{1/2}	2s _{1/2}	2p _{1/2}	2p _{3/2}	3s _{1/2}	3p _{1/2}	3p _{3/2}	MgK _α -излучение	AlK _α -излучение	
Li	3	55									
Be	4	111									
B	5	188									
C	6	284									
N	7	399									
O	8	532	24								
F	9	686	31								
Ne	10	867	45	18							
Na	11	1072	63	31							
Mg	12	1305	89	52							
Al	13		118	74							
Эл-г	Z	2s _{1/2}	2p _{1/2}	2p _{3/2}	3s _{1/2}	3p _{1/2}	3p _{3/2}	MgK _α -излучение	AlK _α -излучение		
Si	14	149	100	99							
P	15	189	136	135							
S	16	229	165	164	16						
Cl	17	270	202	200	18			1103	1336	1304	
								1071			
Ar	18	320	247	245	25			1037	1035		
K	19	377	297	294	34	18			1003		
Ca	20	438	350	347	44	26			964	961	
Sc	21	500	407	402	54	32			920	892	
									1153	1125	
Ti	22	564	461	455	59	34			873	839	
V	23	628	520	513	66	38			822	784	
Cr	24	695	584	575	74	44	43		767	729	
									MgK _α -излучение	AlK _α -излучение	

Эле- мент		Фотоэлектронные линии										Оже-линии												
		2s _{1/2}	2p _{1/2}	2p _{3/2}	3s _{1/2}	3p _{1/2}	3p _{3/2}	MgK _α -излучение					AlK _α -излучение											
Mn	25	769	652	641	84	49	48	715	670	659	608				948	903								
Fe	26	846	723	710	95	56	55	604	597	546	541				892	841								
Co	27	926	794	779	101	61	60	604	597	546	541				837	779	774			786				
Ni	28	1008	872	855	112	69	67	548	542	482	476				483	468	837	775	715	709				
Cu	29	1096	951	931	120	76	74	486	479	416	408	396			337	317	719	712	649	641				
Zn	30	1194	1044	1021	137	90	87	429	422	352	343	329			265	242	662	655	585	576				
Ga	31	1298	1143	1116	158	107	103	368	361	284	275	257			189	162	601	594	517	508				
Эл-т	Z	2p _{3/2}	2p _{3/2}	3s _{1/2}	3p _{1/2}	3p _{3/2}	3d _{5/2}	MgK _α -излучение					AlK _α -излучение											
Ge	32	1249	1217	181	129	122	29	305	297	215	205	184	113	82	538	530	448	438	417	346				
As	33	1359	1323	204	147	141	41	MgK _α -излучение					AlK _α -излучение											
Эл-т	Z	3s _{1/2}	3p _{1/2}	3p _{3/2}	3d _{5/2}	3d _{5/2}	4s _{1/2}	4p _{1/2}	4p _{3/2}	MgK _α -излучение										AlK _α -излучение				
Se	34	232	168	162	58	57									300	288	259	184	143					
Br	35	257	189	182	70	69	27																	
Kr	36	289	223	214	89	88	24																	
Rb	37	322	248	239	112	111	30	15	14															
Sr	38	358	280	269	135	133	38	20																
Y	39	395	313	301	160	158	46	26																
Zr	40	431	345	331	183	180	52	29																
Nb	41	469	379	363	208	205	58	34		1088	1056				1321	1289								
Mo	42	505	410	393	230	227	62	35		1068	1033				1301	1266								
Tc	43	544	445	425	257	253	68	39		1047	1008				1280	1241								
Ru	44	585	483	461	284	279	75	43		1025	981				1258	1214								
Rh	45	627	521	496	312	307	81	48		1002	954				1235	1187								
Pd	46	670	559	531	340	335	86	51		979	928				1212	1161								
Эл-т	Z	3s _{1/2}	3p _{1/2}	3p _{3/2}	3d _{5/2}	3d _{5/2}	4s _{1/2}	4p _{1/2}	4p _{3/2}	MgK _α -излучение					AlK _α -излучение									
Ag	47	717	602	571	373	367	95	62	56						903	897				1130				
Cd	48	770	651	617	411	404	108	67		9					889	872				1105				

Продолжение прил. 8

Эле- мент	Z	Фотоэлектронные линии												Оже-линии			
		3s _{1/2}	3p _{1/2}	3p _{3/2}	3d _{3/2}	3d _{5/2}	4s _{1/2}	4p _{1/2}	4p _{3/2}	4d _{3/2}	4d _{5/2}	4d _{5/2}	MgK _α -излучение		AlK _α -излучение		
In	49	826	702	664	451	443	122	77			16	853	846		1086	1079	
Sn	50	884	757	715	494	485	137	89	25	24		827	819		1060	1052	
Sb	51	944	812	766	537	528	152	99	33	32		803	794		1036	1027	
Te	52	1006	870	819	582	572	168	110	41	40		775	765		1008	998	
I	53	1072	931	875	631	620	186	123	52	50		748	737		981	970	
Xe	54	1145	999	937	685	672	208	147	65	63		724	711		957	944	
Cs	55	1217	1065	998	740	726	231	172	162	79	77	698	684		931	917	
Ba	56	1293	1137	1063	796	781	253	192	180	93	90	671	657		904	890	
Эл-г	Z	3p _{1/2}	3p _{3/2}	3d _{3/2}	3d _{5/2}	4s _{1/2}	4p _{1/2}	4p _{3/2}	4d _{3/2}	4d _{5/2}	5s _{1/2}	5p _{1/2}	5p _{3/2}	MgK _α -излучение		AlK _α -излучение	
La	57	1205	1124	849	832	271	206	192	102	99	40	17	633		865		
Ce	58	1273	1186	902	884	290	224	208	112	108	38	20	594		827		
Pr	59	1338	1243	951	931	305	237	218		114	38	23	555		788		
Nd	60		1298	1000	978	316	244	225		118	38	22	519		752		
Pm	61		1357	1052	1027	331	255	237		121	38	22	481		714		
Sm	62			1107	1081	347	267	249		130	39	22	440		673		
Eu	63			1161	1131	360	284	257		134	32	22	402		635		
Gd	64			1218	1186	376	289	271		141	36	21	362		595		
Tb	65			1276	1242	398	311	286		148	40	26			568	265	
Dy	66			1332	1295	416	332	293		154	63	26			527	375	
Ho	67			1391	1351	436	343	306	161		51	20			490	325	
Er	68	1453	1409	449	366	320	177	168	60	29					454	273	
Tm	69		1468	472	386	337	180		53	32	26					56	
Yb	70			487	396	343	197	184	53	33	26						
Lu	71			506	410	359	205	195	57	34	28						
Эл-г	Z	4s _{1/2}	4p _{1/2}	4p _{3/2}	4d _{3/2}	4d _{5/2}	4f _{5/2}	4f _{7/2}	5s _{1/2}	5p _{1/2}	5p _{3/2}	5d _{3/2}	5d _{5/2}	MgK _α -излучение		AlK _α -излучение	
Hf	72	538	437	380	224	214	19	18	65	38	31						
Ta	73	566	465	405	242	230	27	25	71	45	37						

Окончание прил. 8

Эле- мент	Z	Фотоэлектронные линии													Оже-линии	
		4s _{1/2}	4p _{1/2}	4p _{3/2}	4d _{3/2}	4d _{5/2}	4f _{5/2}	4f _{7/2}	5s _{1/2}	5p _{1/2}	5p _{3/2}	5d _{3/2}	5d _{5/2}	6s _{1/2}	MgK _α -излучение	AlK _α -излучение
W	74	595	492	426	259	246	37	34	77	47	37					
Re	75	625	518	445	274	260	47	45	83	46	35					
Os	76	655	547	469	290	273	52	50	84	58	46					
Ir	77	690	577	495	312	295	63	60	96	63	51					
Pt	78	724	608	519	331	314	74	70	102	66	51			1192	1425	
Au	79	759	644	546	352	334	87	83	108	72	54			1184	1417	
Hg	80	800	677	571	379	360	103	99	120	81	58			1176	1409	1406
Tl	81	846	722	609	407	386	122	118	137	100	76	16	13	1169	1402	
Pb	82	894	764	645	435	413	143	138	148	105	86	22	20	1162	1395	1392
Bi	83	939	806	679	464	440	163	158	160	117	93	27	25	1155	1388	1384
Po	84	995	851	705	500	473	184	177	132	104	31					
At	85	1042	886	740	533	507	210	195	148	115	40					18
Rn	86	1097	929	768	567	541	238	214	164	127	48					26
Fr	87	1153	980	810	603	577	268	234	182	140	58					34
Ra	88	1208	1058	879	636	603	299	254	200	153	68					44
Ac	89	1269	1080	890	675	639	319	272	215	167	80					
Th	90	1330	1168	968	714	677	344	335	290	229	182	95	88	60	1333	1238
Pa	91	1387	1224	1007	743	708	371	360	310	223	94					
Эл-т	Z	4p _{1/2}	4p _{3/2}	4d _{3/2}	4d _{5/2}	4f _{5/2}	4f _{7/2}	5s _{1/2}	5p _{1/2}	5p _{3/2}	5d _{3/2}	5d _{5/2}	6s _{1/2}	6p _{1/2}	MgK _α -излучение	AlK _α -излучение
U	92	1273	1045	780	738	392	381	324	260	195	105	96	46	29	1100	1297
Np	93	1328	1087	817	773	415	404	338	283	206	109	101		29	1064	1203
Pu	94	1377	1120	849	801	438	422	352	279	212	116	105		31		
Am	95	1412	1136	879	828	460	440	367	290	220	116	103		31		
Cm	96	1440	1154	919	865	487	473			232		113		32		
Bk	97		1235	958	901	514	498			246		120		34		
Cf	98		1279	994	933	541	523					124		35		

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Сечения фотоионизации электронных уровней атомов элементов рентгеновским излучением, отнесенные к уровню Cl_s

Атом	Z	$1s_{1/2}$	$2s_{1/2}$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s_{1/2}$	$3p_{1/2}$	$3p_{3/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{5/2}$	$4s_{1/2}$	$4p_{1/2}$	$4p_{3/2}$	$4d_{3/2}$
H	1	0,0002												
He	2	0,0089												
Li	3	0,059	0,0008											
Be	4	0,200	0,007											
B	5	0,492	0,022											
C	6	1,00	0,047	0,0006	0,0012									
N	7	1,78	0,084	0,0025	0,0049									
O	8	2,85	0,134	0,0073	0,0145									
F	9	4,26	0,199	0,0178	0,0352									
Ne	10	5,95	0,277	0,0381	0,0751									
Na	11	7,98	0,390	0,0714	0,141	0,0059								
Mg	12		0,525	0,121	0,239	0,0261								
Al	13		0,681	0,193	0,380	0,0485	0,0485	0,0023						
Si	14		0,855	0,292	0,573	0,0726	0,0726	0,0097						
P	15		1,05	0,422	0,828	0,0998	0,0129	0,0253						
S	16		1,25	0,590	1,155	0,130	0,0269	0,0527						
Cl	17		1,48	0,810	1,564	0,163	0,0493	0,0963						
Ar	18			1,71	1,06	2,07	0,199	0,0503	0,161					
K	19			1,96	1,37	2,67	0,249	0,122	0,238			0,006		
Ca	20			2,21	1,74	3,39	0,305	0,169	0,330			0,023		
Sc	21			2,46	2,18	4,24	0,356	0,216	0,420	0,002	0,003	0,027		
Ti	22			2,72	2,68	5,22	0,408	0,268	0,521	0,006	0,009	0,031		
V	23		2,98	3,26	6,33	0,462	0,326	0,633	0,014	0,021	0,034			

Продолжение прил. 9

Атом	Z	2s _{1/2}	2p _{1/2}	2p _{3/2}	3s _{1/2}	3p _{1/2}	3p _{3/2}	3d _{3/2}	4s _{1/2}	4p _{1/2}	4p _{3/2}	4d _{3/2}	4d _{5/2}
Cr	24	3,23	3,92	7,60	0,511	0,382	0,740	0,030	0,044				
Mn	25	3,48	4,63	8,99	0,575	0,460	0,892	0,048	0,071				
Fe	26	3,70	5,43	10,5	0,634	0,535	1,04	0,079	0,116				
Co	27	3,92	6,28	12,2	0,693	0,616	1,19	0,122	0,179				
Ni	28	4,16	7,18	13,9	0,753	0,701	1,36	0,181	0,265				
Cu	29	4,38	8,18	15,9	0,805	0,779	1,50	0,268	0,390				
Zn	30	4,55	9,29	18,0	0,873	0,882	1,70	0,365	0,532				
Ga	31		10,6	20,5	0,945	0,993	1,92	0,485	0,708	0,006			
Ge	32			21,2	1,02	1,11	2,15	0,631	0,920	0,018	0,034		
As	33				1,10	1,24	2,40	0,802	1,17	0,037	0,071		
Se	34				1,18	1,37	2,65	1,00	1,46	0,064	0,123		
Br	35				1,26	1,50	2,92	1,24	1,80	0,100	0,191		
Kr	36				1,35	1,64	3,20	1,50	2,19	0,144	0,276		
Атом	Z	3s _{1/2}	3p _{1/2}	3p _{3/2}	3d _{3/2}	3d _{5/2}	4s _{1/2}	4p _{1/2}	4p _{3/2}	4d _{3/2}	5s _{1/2}	5p _{1/2}	5p _{3/2}
Rb	37	1,43	1,79	3,48	1,81	2,63	0,209	0,187	0,361		0,006		
Sr	38	1,52	1,93	3,78	2,15	3,14	0,242	0,230	0,445		0,021		
Y	39	1,61	2,08	4,09	2,54	3,70	0,273	0,268	0,521	0,013	0,019		
Zr	40	1,70	2,24	4,40	2,97	4,33	0,305	0,307	0,596	0,035	0,051		
Nb	41	1,79	2,39	4,71	3,45	5,01	0,333	0,340	0,661	0,082	0,118		
Mo	42	1,89	2,54	5,03	3,97	5,77	0,364	0,379	0,739	0,130	0,187		
Tc	43	1,98	2,69	5,36	4,54	6,60	0,397	0,419	0,818	0,192	0,276		
Ru	44	2,07	2,84	5,68	5,17	7,51	0,429	0,460	0,899	0,269	0,387		
Rh	45	2,15	2,98	6,00	5,84	8,48	0,463	0,501	0,981	0,365	0,524		
Pd	46	2,24	3,12	6,33	6,58	9,54	0,494	0,538	1,06	0,495	0,707		
Ag	47	2,33	3,25	6,64	7,36	10,7	0,531	0,586	1,15	0,616	0,884		
Cd	48	2,40	3,39	6,96	8,22	11,9	0,571	0,636	1,26	0,747	1,07		
In	49	2,48	3,51	7,27	9,13	13,2	0,611	0,689	1,37	0,893	1,29	0,063	0,011
Sn	50	2,54	3,62	7,58	10,1	14,6	0,653	0,743	1,48	1,05	1,51	0,076	0,031

Атом	Z	3s _{1/2}	3p _{1/2}	3p _{3/2}	3d _{3/2}	3d _{5/2}	4s _{1/2}	4p _{1/2}	4p _{3/2}	4d _{3/2}	4d _{5/2}	4f _{7/2}	5s _{1/2}	5p _{1/2}	5p _{3/2}	5d _{3/2}
Sb	51	2,60	3,71	7,86	11,1	16,1	0,696	0,799	1,60	1,22	1,76	0,090	0,033	0,063		
Te	52	2,67	3,79	8,14	12,2	17,7	0,741	0,856	1,73	1,40	2,01	0,104	0,054	0,104		
I	53	2,75	3,87	8,37	13,3	19,3	0,785	0,913	1,86	1,58	2,29	0,117	0,080	0,156		
Xe	54	2,83	3,95	8,64	14,5	21,1	0,831	0,971	1,99	1,78	2,57	0,132	0,112	0,218		
Cs	55	2,84	4,04	8,94	15,8	22,9	0,877	1,03	2,12	1,99	2,88	0,152	0,140	0,278		
Ba	56		4,10	9,26	17,0	24,8	0,924	1,09	2,26	2,21	3,20	0,174	0,166	0,334		
La	57		4,06	9,52	18,2	26,5	0,971	1,15	2,40	2,44	3,53	0,193	0,189	0,382	0,019	
Атом	Z	3p _{3/2}	3d _{3/2}	3d _{5/2}	4s _{1/2}	4p _{1/2}	4p _{3/2}	4d _{3/2}	4d _{5/2}	4f _{7/2}	4f _{5/2}	5s _{1/2}	5p _{1/2}	5p _{3/2}	5d _{3/2}	
Ce	58	9,67	19,7	28,6	1,00	1,18	2,49	2,58	3,74	0,069	0,088	0,189	0,180	0,365		
Pr	59	9,75	21,1	30,7	1,04	1,22	2,59	2,76	4,00	0,126	0,161	0,196	0,186	0,378		
Nd	60		22,6	32,9	1,07	1,26	2,70	2,95	4,28	0,200	0,257	0,202	0,191	0,390		
Pm	61		24,3	35,3	1,10	1,30	2,81	3,14	4,55	0,296	0,378	0,208	0,196	0,400		
Sm	62		26,1	37,9	1,14	1,34	2,91	3,33	4,82	0,416	0,531	0,213	0,201	0,412		
Eu	63		28,2	40,9	1,17	1,37	3,01	3,51	5,09	0,562	0,718	0,219	0,205	0,422		
Gd	64		24,3	43,4	1,20	1,41	3,13	3,73	5,41	0,693	0,887	0,235	0,223	0,465	0,022	
Атом	Z	3d _{5/2}	4s _{1/2}	4p _{1/2}	4p _{3/2}	4d _{3/2}	4d _{5/2}	4f _{5/2}	4f _{7/2}	5s _{1/2}	5p _{1/2}	5p _{3/2}	5d _{3/2}	6s _{1/2}		
Tb	65	20,8	1,22	1,43	3,21	3,88	5,61	0,949	1,21	0,228	0,211	0,440		0,019		
Dy	66		1,25	1,45	3,30	4,05	5,87	1,20	1,52	0,232	0,214	0,449		0,019		
Ho	67		1,27	1,47	3,39	4,22	6,13	1,49	1,89	0,237	0,216	0,457		0,019		
Er	68		1,29	1,49	3,48	4,39	6,37	1,82	2,31	0,240	0,219	0,464		0,019		
Tm	69		1,31	1,50	3,56	4,56	6,62	2,20	2,78	0,244	0,220	0,471		0,019		
Yb	70		1,32	1,51	3,64	4,72	6,85	2,63	3,33	0,247	0,222	0,478		0,019		
Lu	71		1,34	1,52	3,73	4,91	7,13	3,05	3,87	0,261	0,237	0,519	0,021	0,029	0,023	
Hf	72		1,36	1,53	3,83	5,10	7,42	3,50	4,45	0,271	0,252	0,562	0,054	0,074	0,026	
Ta	73		1,38	1,54	3,93	5,29	7,15	3,99	5,08	0,290	0,268	0,606	0,098	0,136	0,029	
Атом	Z	4s _{1/2}	4p _{1/2}	4p _{3/2}	4d _{3/2}	4d _{5/2}	4f _{5/2}	4f _{7/2}	5s _{1/2}	5p _{1/2}	5p _{3/2}	5d _{3/2}	6s _{1/2}			
W	74	1,39	1,55	4,03	5,48	8,01	4,92	5,75	0,306	0,283	0,651	0,152	0,212	0,301		
Re	75	1,41	1,55	4,13	5,67	8,30	5,08	6,46	0,321	0,299	0,697	0,217	0,303	0,033		

Окончание прил. 9

Атом	Z	$4s_{1/2}$	$4p_{1/2}$	$4p_{3/2}$	$4d_{3/2}$	$4d_{5/2}$	$4f_{5/2}$	$4f_{7/2}$	$5s_{1/2}$	$5p_{1/2}$	$5p_{3/2}$	$5d_{3/2}$	$5d_{5/2}$	$6s_{1/2}$	$6p_{1/2}$
Os	76	1,42	1,55	4,24	5,86	8,60	5,67	7,22	0,337	0,314	0,743	0,293	0,410	0,033	
Ir	77	1,43	1,55	4,34	6,05	8,90	6,30	8,03	0,350	0,324	0,774	0,431	0,593		
Pt	78	1,44	1,54	4,45	6,24	9,20	6,97	8,87	0,366	0,340	0,825	0,508	0,709	0,017	
Au	79	1,45	1,53	4,55	6,42	9,50	7,68	9,79	0,380	0,353	0,877	0,619	0,865	0,017	
Hg	80	1,45	1,52	4,65	6,60	9,79	8,43	10,80	0,397	0,368	0,935	0,707	0,997	0,040	
Tl	81	1,46	1,50	4,75	6,78	10,10	9,22	11,80	0,413	0,383	0,996	0,804	1,140	0,051	
Pb	82	1,46	1,47	4,86	6,94	10,4	10,0	12,80	0,430	0,398	1,060	0,900	1,290	0,059	0,011
Bi	83	1,44	1,45	4,96	7,11	10,6	10,9	14,00	0,446	0,412	1,120	0,997	1,440	0,068	0,021

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Кинематический фактор рассеяния ионов ^4He на атомах элементов

Элемент	Z	Атомная масса, а. е. м.	Атомная плотность, атом/см ³	Угол рассеяния θ									
				180°	175°	170°	165°	160°	140°	120°	90°	60°	30°
H	1	1,0079											
He	2	4,0026											
Li	3	6,9410	$4,70 \cdot 10^{22}$	0,0720	0,0723	0,0733	0,0749	0,0773	0,0953	0,1343	0,2684	0,5363	0,8539
Be	4	9,0122	$1,21 \cdot 10^{23}$	0,1482	0,1487	0,1502	0,1527	0,1564	0,1832	0,2356	0,3849	0,6288	0,8864
B	5	10,8110	$1,30 \cdot 10^{23}$	0,2112	0,2118	0,2136	0,2166	0,2209	0,2519	0,3093	0,4596	0,6829	0,9048
C	6	12,0110	$1,76 \cdot 10^{23}$	0,2501	0,2507	0,2526	0,2559	0,2604	0,2929	0,3518	0,5001	0,7108	0,9140
N	7	14,0067		0,3086	0,3092	0,3113	0,3147	0,3194	0,3531	0,4127	0,5555	0,7477	0,9259
O	8	15,9994		0,3597	0,3604	0,3625	0,3659	0,3708	0,4047	0,4635	0,5998	0,7761	0,9349
F	9	18,9984		0,4250	0,4257	0,4278	0,4312	0,4360	0,4693	0,5258	0,6520	0,8084	0,9450
Ne	10	20,1797	$4,36 \cdot 10^{22}$	0,4476	0,4483	0,4503	0,4537	0,4584	0,4913	0,5466	0,6690	0,8188	0,9481
Na	11	22,9898	$2,65 \cdot 10^{22}$	0,4948	0,4955	0,4974	0,5007	0,5053	0,5369	0,5896	0,7034	0,8393	0,9543
Mg	12	24,3050	$4,30 \cdot 10^{22}$	0,5145	0,5151	0,5171	0,5203	0,5248	0,5558	0,6071	0,7173	0,8474	0,9568
Al	13	26,9815	$6,02 \cdot 10^{22}$	0,5500	0,5506	0,5525	0,5556	0,5600	0,5896	0,6384	0,7416	0,8615	0,9610
Si	14	28,0855	$5,00 \cdot 10^{22}$	0,5633	0,5639	0,5657	0,5683	0,5731	0,6022	0,6500	0,7505	0,8666	0,9625
P	15	30,9738		0,5946	0,5952	0,5970	0,5999	0,6040	0,6318	0,6770	0,7711	0,8784	0,9659
S	16	32,0660		0,6054	0,6059	0,6077	0,6105	0,6145	0,6418	0,6861	0,7780	0,8823	0,9671
Cl	17	35,4527		0,6354	0,6359	0,6376	0,6403	0,6441	0,6699	0,7115	0,7971	0,8930	0,9702
Ar	18	39,9480	$2,66 \cdot 10^{22}$	0,6689	0,6694	0,6709	0,6735	0,6770	0,7010	0,7395	0,8179	0,9045	0,9735
K	19	39,0983	$1,40 \cdot 10^{22}$	0,6631	0,6636	0,6651	0,6677	0,6713	0,6956	0,7347	0,8143	0,9025	0,9729
Ca	20	40,0780	$2,30 \cdot 10^{22}$	0,6698	0,6703	0,6718	0,6744	0,6779	0,7019	0,7403	0,8184	0,9048	0,9736
Sc	21	44,9559	$4,27 \cdot 10^{22}$	0,6997	0,7002	0,7016	0,7040	0,7073	0,7295	0,7650	0,8365	0,9147	0,9764

Продолжение прил. 10

Элемент	Z	Атомная масса, а. е. м.	Атомная плотность, атом/см ³	Угол рассеяния θ										
				180°	175°	170°	165°	160°	140°	120°	90°	60°	30°	
Ti	22	47,8800	$5,66 \cdot 10^{22}$	0,7153	0,7158	0,7171	0,7194	0,7226	0,7439	0,7778	0,8458	0,9197	0,9778	
V	23	50,9415	$7,22 \cdot 10^{22}$	0,7298	0,7303	0,7316	0,7338	0,7368	0,7572	0,7896	0,8543	0,9243	0,9792	
Cr	24	51,9961	$8,33 \cdot 10^{22}$	0,7345	0,7350	0,7362	0,7384	0,7414	0,7615	0,7934	0,8570	0,9258	0,9796	
Mn	25	54,9380	$8,18 \cdot 10^{22}$	0,7468	0,7472	0,7485	0,7505	0,7534	0,7727	0,8033	0,8642	0,9297	0,9807	
Fe	26	55,8470	$8,50 \cdot 10^{22}$	0,7504	0,7508	0,7520	0,7541	0,7569	0,7760	0,8062	0,8662	0,9308	0,9810	
Co	27	58,9332	$8,97 \cdot 10^{22}$	0,7618	0,7622	0,7634	0,7653	0,7681	0,7864	0,8154	0,8728	0,9343	0,9820	
Ni	28	58,6900	$9,14 \cdot 10^{22}$	0,7610	0,7614	0,7626	0,7645	0,7673	0,7857	0,8147	0,8724	0,9340	0,9819	
Cu	29	63,5460	$8,45 \cdot 10^{22}$	0,7770	0,7774	0,7785	0,7803	0,7829	0,8003	0,8276	0,8815	0,9399	0,9833	
Zn	30	65,3900	$6,55 \cdot 10^{22}$	0,7825	0,7829	0,7840	0,7858	0,7883	0,8053	0,8320	0,8846	0,9406	0,9837	
Ga	31	69,7230	$5,10 \cdot 10^{22}$	0,7946	0,7950	0,7960	0,7977	0,8001	0,8163	0,8416	0,8914	0,9442	0,9847	
Ge	32	72,6100	$4,42 \cdot 10^{22}$	0,8019	0,8022	0,8032	0,8049	0,8072	0,8229	0,8474	0,8955	0,9463	0,9853	
As	33	74,9216	$4,65 \cdot 10^{22}$	0,8074	0,8078	0,8087	0,8104	0,8127	0,8279	0,8518	0,8986	0,9479	0,9858	
Se	34	78,9600	$3,67 \cdot 10^{22}$	0,8163	0,8166	0,8175	0,8192	0,8213	0,8359	0,8588	0,9035	0,9505	0,9865	
Br	35	79,9040	$2,36 \cdot 10^{22}$	0,8183	0,8186	0,8195	0,8211	0,8233	0,8377	0,8604	0,9046	0,9511	0,9867	
Kr	36	83,8000	$2,17 \cdot 10^{22}$	0,8260	0,8263	0,8272	0,8287	0,8307	0,8446	0,8664	0,9088	0,9533	0,9873	
Rb	37	85,4678	$1,15 \cdot 10^{22}$	0,8281	0,8294	0,8302	0,8317	0,8338	0,8474	0,8688	0,9105	0,9542	0,9875	
Sr	38	87,6200	$1,78 \cdot 10^{22}$	0,8329	0,8332	0,8340	0,8355	0,8375	0,8509	0,8718	0,9126	0,9553	0,9878	
Y	39	88,9058	$3,02 \cdot 10^{22}$	0,8351	0,8354	0,8362	0,8377	0,8396	0,8529	0,8736	0,9138	0,9560	0,9880	
Zr	40	91,2240	$4,29 \cdot 10^{22}$	0,8389	0,8392	0,8401	0,8414	0,8434	0,8563	0,8766	0,9159	0,9571	0,9883	
Nb	41	92,9064	$5,56 \cdot 10^{22}$	0,8416	0,8419	0,8427	0,8441	0,8460	0,8588	0,8787	0,9174	0,9578	0,9885	
Mo	42	95,9400	$6,42 \cdot 10^{22}$	0,8462	0,8465	0,8473	0,8486	0,8505	0,8629	0,8823	0,9199	0,9591	0,9889	
Tc	43	98,9072	$7,04 \cdot 10^{22}$	0,8506	0,8509	0,8516	0,8530	0,8548	0,8669	0,8857	0,9223	0,9604	0,9892	
Ru	44	101,0700	$7,36 \cdot 10^{22}$	0,8534	0,8537	0,8545	0,8557	0,8575	0,8694	0,8879	0,9238	0,9612	0,9894	
Rh	45	102,9055	$7,26 \cdot 10^{22}$	0,8559	0,8561	0,8569	0,8581	0,8599	0,8716	0,8898	0,9251	0,9618	0,9896	
Pd	46	106,4200	$6,80 \cdot 10^{22}$	0,8602	0,8605	0,8612	0,8624	0,8642	0,8755	0,8932	0,9275	0,9631	0,9900	

Эле- мент	Z	Атомная масса, а. е. м.	Атомная плотность, атом/см ³	Угол рассеяния θ										
				180°	175°	170°	165°	160°	140°	120°	90°	60°	30°	
Ag	47	107,8682	$5,85 \cdot 10^{22}$	0,8620	0,8623	0,8630	0,8642	0,8659	0,8771	0,8946	0,9284	0,9636	0,9901	
Cd	48	112,4110	$4,64 \cdot 10^{22}$	0,8672	0,8674	0,8681	0,8693	0,8709	0,8818	0,8986	0,9312	0,9650	0,9905	
In	49	114,8200	$3,83 \cdot 10^{22}$	0,8698	0,8700	0,8707	0,8719	0,8735	0,8841	0,9007	0,9326	0,9657	0,9907	
Sn	50	118,7100	$3,62 \cdot 10^{22}$	0,8738	0,8740	0,8747	0,8758	0,8773	0,8877	0,9037	0,9348	0,9668	0,9910	
Sb	51	121,7500	$3,31 \cdot 10^{22}$	0,8767	0,8770	0,8776	0,8787	0,8802	0,8903	0,9060	0,9363	0,9677	0,9912	
Te	52	127,6000	$2,94 \cdot 10^{22}$	0,8820	0,8823	0,8829	0,8839	0,8854	0,8951	0,9102	0,9392	0,9691	0,9916	
I	53	126,9045	$2,36 \cdot 10^{22}$	0,8814	0,8816	0,8823	0,8833	0,8848	0,8945	0,9097	0,9388	0,9689	0,9916	
Xe	54	131,2900	$1,64 \cdot 10^{22}$	0,8852	0,8854	0,8860	0,8870	0,8884	0,8979	0,9126	0,9408	0,9700	0,9919	
Cs	55	132,9054	$9,05 \cdot 10^{22}$	0,8865	0,8867	0,8873	0,8883	0,8897	0,8991	0,9136	0,9415	0,9703	0,9920	
Ba	56	137,3270	$1,60 \cdot 10^{22}$	0,8899	0,8901	0,8907	0,8917	0,8931	0,9022	0,9163	0,9434	0,9713	0,9922	
La	57	138,9055	$2,70 \cdot 10^{22}$	0,8911	0,8913	0,8919	0,8929	0,8942	0,9032	0,9172	0,9440	0,9716	0,9923	
Ce	58	140,1015	$2,91 \cdot 10^{22}$	0,8920	0,8922	0,8928	0,8937	0,8951	0,9040	0,9178	0,9445	0,9718	0,9924	
Pr	59	140,9076	$2,92 \cdot 10^{22}$	0,8926	0,8928	0,8933	0,8943	0,8956	0,9045	0,9183	0,9448	0,9720	0,9924	
Nd	60	144,2400	$2,93 \cdot 10^{22}$	0,8949	0,8951	0,8957	0,8966	0,8979	0,9066	0,9201	0,9460	0,9726	0,9926	
Pm	61	144,9127	$3,00 \cdot 10^{22}$	0,8968	0,8970	0,8975	0,8984	0,8997	0,9083	0,9215	0,9470	0,9731	0,9927	
Sm	62	150,3600	$3,03 \cdot 10^{22}$	0,8990	0,8991	0,8997	0,9006	0,9019	0,9102	0,9232	0,9481	0,9737	0,9929	
Eu	63	151,9650	$2,04 \cdot 10^{22}$	0,9000	0,9002	0,9007	0,9016	0,9028	0,9111	0,9240	0,9487	0,9740	0,9930	
Gd	64	157,2500	$3,02 \cdot 10^{22}$	0,9032	0,9034	0,9039	0,9047	0,9060	0,9140	0,9265	0,9504	0,9749	0,9932	
Tb	65	158,9253	$3,22 \cdot 10^{22}$	0,9041	0,9043	0,9048	0,9057	0,9069	0,9149	0,9272	0,9509	0,9751	0,9933	
Dy	66	162,5000	$3,17 \cdot 10^{22}$	0,9062	0,9063	0,9068	0,9077	0,9089	0,9167	0,9288	0,9519	0,9757	0,9934	
Ho	67	164,9303	$3,22 \cdot 10^{22}$	0,9075	0,9076	0,9081	0,9090	0,9101	0,9178	0,9298	0,9526	0,9760	0,9935	
Er	68	167,2600	$3,26 \cdot 10^{22}$	0,9087	0,9089	0,9094	0,9102	0,9113	0,9189	0,9307	0,9533	0,9764	0,9936	
Tm	69	168,9342	$3,32 \cdot 10^{22}$	0,9096	0,9097	0,9102	0,9110	0,9122	0,9197	0,9314	0,9537	0,9766	0,9937	
Yb	70	173,0400	$3,02 \cdot 10^{22}$	0,9116	0,9118	0,9123	0,9131	0,9142	0,9215	0,9329	0,9548	0,9771	0,9938	
Lu	71	174,9670	$3,39 \cdot 10^{22}$	0,9125	0,9127	0,9132	0,9140	0,9151	0,9224	0,9337	0,9553	0,9774	0,9939	

Окончание прил. 10

Эле- мент	Z	Атомная масса, а. е. м.	Атомная плотность, атом/см ³	Угол рассеяния θ									
				180°	175°	170°	165°	160°	140°	120°	90°	60°	30°
Hf	72	178,4900	$4,52 \cdot 10^{22}$	0,9142	0,9143	0,9148	0,9156	0,9167	0,9238	0,9349	0,9561	0,9778	0,9940
Ta	73	180,9479	$5,55 \cdot 10^{22}$	0,9150	0,9155	0,9159	0,9167	0,9178	0,9248	0,9358	0,9567	0,9781	0,9941
W	74	183,8500	$6,30 \cdot 10^{22}$	0,9166	0,9167	0,9172	0,9179	0,9190	0,9260	0,9368	0,9574	0,9785	0,9942
Re	75	186,2070	$6,80 \cdot 10^{22}$	0,9176	0,9177	0,9182	0,9189	0,9200	0,9269	0,9375	0,9579	0,9787	0,9943
Os	76	190,2000	$7,14 \cdot 10^{22}$	0,9193	0,9194	0,9198	0,9206	0,9216	0,9284	0,9388	0,9588	0,9792	0,9944
Ir	77	192,2200	$7,06 \cdot 10^{22}$	0,9201	0,9202	0,9206	0,9214	0,9224	0,9291	0,9394	0,9592	0,9794	0,9944
Pt	78	195,0800	$6,62 \cdot 10^{22}$	0,9212	0,9213	0,9218	0,9225	0,9235	0,9301	0,9403	0,9598	0,9797	0,9945
Au	79	196,9665	$5,90 \cdot 10^{22}$	0,9219	0,9221	0,9225	0,9232	0,9242	0,9307	0,9408	0,9602	0,9799	0,9946
Hg	80	200,5900	$4,26 \cdot 10^{22}$	0,9233	0,9234	0,9238	0,9245	0,9255	0,9319	0,9419	0,9609	0,9802	0,9947
Tl	81	204,3833	$3,50 \cdot 10^{22}$	0,9246	0,9248	0,9252	0,9259	0,9268	0,9332	0,9429	0,9616	0,9806	0,9948
Pb	82	207,2000	$3,30 \cdot 10^{22}$	0,9256	0,9258	0,9262	0,9268	0,9278	0,9340	0,9437	0,9621	0,9809	0,9948
Bi	83	208,9804	$2,82 \cdot 10^{22}$	0,9262	0,9264	0,9268	0,9275	0,9284	0,9346	0,9442	0,9624	0,9810	0,9949

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Сечение торможения ионов ${}^4\text{He}$ на атомах элементов, эВ/(10^{15} атом/см 2)

Атом	Z	Энергия ионов ${}^4\text{He}$, кэВ															
		400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2400	2800	3200	3600	4000		
H	1	14,02	14,11	13,50	12,49	11,34	10,19	9,154	8,289	7,606	6,75	6,08	5,534	5,108	4,683		
He	2	16,72	17,88	18,03	17,52	16,63	15,56	14,46	13,44	12,52	11,12	10,02	9,117	8,416	7,714		
Li	3	22,28	21,99	21,46	20,64	19,60	18,42	17,28	16,24	15,35	13,63	12,30	11,22	10,33	9,587		
Be	4	27,09	26,76	25,89	24,71	23,40	22,06	20,80	19,65	18,64	16,55	14,93	13,61	12,61	11,68		
B	5	32,60	33,49	32,67	31,27	29,48	27,59	25,74	24,10	22,70	20,09	18,09	16,51	15,22	14,14		
C	6	33,32	36,58	37,21	36,19	34,27	31,99	29,72	27,68	25,97	23,10	20,80	18,99	17,59	16,36		
N	7	46,23	48,45	48,12	46,24	43,54	40,58	37,71	35,15	32,98	29,39	26,68	24,45	22,60	21,05		
O	8	44,34	47,72	48,39	47,34	45,29	42,81	40,27	37,91	35,84	32,39	29,54	27,21	25,18	23,55		
F	9	40,07	43,99	45,66	45,73	44,76	43,15	41,24	39,24	37,31	34,44	31,79	29,46	27,45	25,75		
Ne	10	39,32	43,59	45,54	45,86	45,10	43,68	41,92	40,06	38,24	35,79	33,56	31,55	29,66	27,99		
Na	11	42,02	44,08	44,95	44,88	44,24	43,14	41,96	40,73	39,56	36,57	34,04	31,86	29,95	28,24		
Mg	12	56,04	57,26	56,78	55,26	53,21	50,99	48,82	46,85	45,11	41,57	38,67	36,20	34,16	32,33		
Al	13	55,39	54,86	53,81	52,43	50,85	49,18	47,50	45,85	44,25	40,38	37,38	34,96	32,92	31,08		
Si	14	70,15	71,09	69,44	66,30	62,50	58,62	55,02	51,88	49,26	44,71	41,27	38,44	36,11	34,09		
P	15	64,66	68,45	67,57	65,13	62,06	58,88	55,87	53,08	50,67	45,88	42,17	39,14	36,66	34,55		
S	16	62,12	68,61	69,72	67,75	64,72	61,48	58,37	55,41	52,89	47,81	43,88	40,68	38,06	35,83		
Cl	17	83,26	86,50	84,96	80,68	75,18	69,52	64,36	60,04	56,65	51,15	46,98	43,53	40,68	38,34		
Ar	18	83,61	88,70	87,82	83,47	77,52	71,27	65,56	60,81	57,13	51,75	47,56	44,07	41,18	38,79		
K	19	83,16	89,08	90,61	88,88	85,56	80,68	75,61	70,84	66,64	60,13	54,97	50,80	47,36	44,45		
Ca	20	93,78	97,30	97,14	94,47	90,50	85,61	80,58	75,64	71,19	64,19	58,63	54,10	50,37	47,21		
Sc	21	92,58	96,27	96,30	93,86	90,42	85,73	81,12	76,65	72,53	65,71	60,17	55,60	51,80	48,58		
Ti	22	91,07	95,41	95,76	93,54	89,87	85,55	81,14	77,00	73,31	67,61	62,56	58,04	54,17	50,84		

Продолжение прил. 11

Атом		Энергия ионов ⁴ He, кэВ														
Z		400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2400	2800	3200	3600	4000	
V	23	86,19	90,13	90,55	88,70	85,58	81,89	78,13	74,60	71,45	66,28	61,75	57,64	53,95	50,79	
Cr	24	79,42	84,81	86,62	85,97	83,76	80,68	77,24	73,78	70,51	66,16	62,13	58,54	55,17	52,12	
Mn	25	77,08	82,69	84,40	83,60	81,35	78,41	75,30	72,36	69,72	65,29	61,39	58,01	54,85	52,00	
Fe	26	80,15	86,90	89,26	88,64	86,13	82,59	78,65	74,71	71,05	66,57	62,86	59,59	56,64	54,02	
Co	27	72,11	79,07	82,04	82,29	80,82	78,38	75,50	72,55	69,75	65,50	62,01	58,96	56,23	53,73	
Ni	28	68,29	74,60	77,74	78,66	78,07	76,56	74,54	72,30	70,04	66,00	62,00	58,55	56,64	49,94	
Cu	29	62,41	68,20	71,77	73,58	74,05	73,50	72,24	70,51	68,48	64,90	62,00	59,34	56,91	54,72	
Zn	30	65,53	70,47	72,85	73,47	72,98	71,71	69,97	68,12	66,04	62,25	59,06	56,35	53,91	51,77	
Ga	31	74,23	78,12	79,41	79,12	77,79	75,86	73,60	71,25	68,82	64,46	60,89	57,91	55,29	53,00	
Ge	32	77,76	81,90	82,76	82,10	80,26	77,76	75,18	72,46	69,80	65,08	61,25	58,10	55,38	53,02	
As	33	81,41	87,03	87,98	87,02	84,84	82,01	79,14	75,97	73,05	67,85	63,66	60,24	57,32	54,80	
Se	34	83,20	89,40	89,80	87,80	84,90	81,60	78,40	75,30	72,40	67,06	62,88	59,43	56,50	53,99	
Br	35	95,55	101,1	101,1	97,91	93,04	87,70	82,65	78,29	74,75	69,06	64,64	60,96	57,90	55,17	
Kr	36	102,2	108,2	108,0	104,2	98,67	92,74	87,26	82,66	79,04	69,04	64,21	60,94	58,00	55,00	
Rb	37	98,18	108,3	110,1	107,4	102,6	97,34	92,40	87,67	83,47	76,51	71,01	66,59	62,85	59,70	
Sr	38	109,0	117,0	117,4	114,2	109,0	103,1	97,75	92,56	87,93	80,30	74,20	69,51	65,46	62,04	
Y	39	110,0	120,4	121,1	117,3	111,6	105,5	99,60	93,90	88,80	84,35	77,65	72,11	67,92	64,37	
Zr	40	115,4	126,0	126,6	123,2	117,9	112,0	106,2	100,7	97,50	87,64	81,02	75,72	71,20	67,44	
Nb	41	118,1	128,2	128,7	125,1	119,8	114,0	108,4	103,0	98,10	90,26	83,66	78,21	73,66	69,88	
Mo	42	109,8	120,5	122,2	119,6	115,1	110,0	104,8	99,88	95,21	88,09	81,86	76,49	72,01	68,18	
Tc	43	116,0	126,8	128,9	126,3	121,2	115,4	109,2	103,7	97,85	90,14	83,58	78,09	73,43	69,48	
Ru	44	104,1	116,8	120,5	119,5	116,0	111,3	105,8	100,7	95,86	89,05	82,95	77,71	73,21	69,35	
Rh	45	100,9	113,6	117,7	117,2	113,9	109,5	104,6	99,85	95,42	89,21	83,44	78,33	73,87	70,03	
Pd	46	89,09	104,9	111,9	112,9	110,3	105,8	100,5	95,32	90,65	86,26	81,88	77,72	73,77	70,04	
Ag	47	88,63	101,9	108,4	110,2	108,8	105,4	100,9	96,02	91,22	86,66	82,54	78,53	73,98	68,91	
Cd	48	96,33	107,0	112,0	113,0	111,4	108,1	103,8	99,24	94,71	89,47	84,81	80,43	76,31	72,53	
In	49	104,1	110,1	113,7	115,2	114,8	112,7	109,3	105,0	100,0	94,46	89,90	85,69	81,81	78,17	
Sn	50	108,2	115,8	118,6	118,3	115,8	112,1	107,9	103,6	99,49	93,82	89,04	84,81	81,14	77,70	

Продолжение прил. 11

Атом		Энергия ионов ⁴ He, кэВ													
Z		400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2400	2800	3200	3600	4000
51	Sb	116,2	122,2	122,2	119,9	116,8	113,3	110,0	106,8	103,7	97,58	92,45	88,01	84,26	80,61
52	Te	121,3	127,2	126,5	123,4	119,4	115,3	111,2	107,4	103,9	97,50	92,23	87,74	83,82	80,34
53	I	135,0	141,7	141,0	135,8	128,5	120,6	113,2	106,7	101,5	95,02	89,84	85,31	81,53	78,07
54	Xe	144,7	149,7	148,2	143,0	136,0	128,7	122,0	116,2	111,5	104,1	98,28	93,26	89,05	85,31
55	Cs	129,7	141,5	143,1	139,7	134,4	128,7	123,2	117,9	113,1	105,0	98,36	92,91	88,36	84,29
56	Ba	141,2	150,7	151,4	147,4	141,3	134,9	128,7	122,9	117,6	108,7	101,6	95,71	90,86	86,53
57	La	144,7	156,5	156,9	152,3	145,7	138,6	131,7	125,1	119,0	109,9	102,6	96,71	91,72	87,50
58	Ce	136,4	146,1	147,7	144,5	139,1	133,2	127,4	121,8	116,7	108,0	101,0	95,22	90,56	86,27
59	Pr	134,1	143,8	145,7	142,9	137,8	132,2	126,5	121,0	116,0	107,5	100,5	94,84	90,27	86,02
60	Nd	131,9	141,6	143,5	141,0	136,5	131,0	125,5	120,2	115,3	106,9	99,99	94,40	89,80	85,71
61	Pm	129,7	139,4	141,4	139,2	135,1	129,8	124,4	119,2	114,5	106,2	99,41	93,91	89,35	85,35
62	Sm	127,7	137,7	139,4	137,4	133,2	128,4	123,3	118,3	113,6	105,5	99,80	93,37	88,86	84,96
63	Eu	125,8	135,6	137,4	135,6	131,7	127,1	122,1	117,3	112,7	104,7	98,15	92,81	88,34	84,53
64	Gd	130,1	139,9	141,7	139,9	135,8	131,1	125,8	120,8	116,0	107,7	100,8	95,23	90,57	86,59
65	Tb	122,2	131,7	133,6	132,2	128,7	124,5	119,7	115,2	110,8	103,1	96,80	91,62	87,24	83,63
66	Dy	111,5	123,9	128,1	127,9	125,4	121,8	117,7	113,5	109,5	102,3	96,40	91,36	87,11	83,41
67	Ho	107,5	118,4	122,4	122,3	120,1	117,0	113,2	109,5	105,7	98,56	92,71	87,83	83,66	80,21
68	Er	106,1	116,8	120,8	120,7	118,6	115,7	112,0	108,4	104,8	97,70	91,98	87,17	83,07	79,65
69	Tm	104,7	115,2	119,2	119,2	117,2	114,1	110,8	107,2	103,7	96,82	91,22	86,46	82,43	79,06
70	Yb	103,5	113,8	117,7	117,8	115,9	113,0	109,7	106,2	102,9	96,06	90,57	85,87	81,89	78,54
71	Lu	106,3	116,9	120,4	120,2	118,1	115,0	111,6	108,0	104,5	97,42	91,75	86,89	82,79	79,34
72	Hf	109,7	120,8	124,5	124,3	122,2	118,9	115,4	111,6	108,0	100,6	94,70	89,62	85,32	81,72
73	Ta	105,8	117,5	121,7	121,8	119,8	116,7	113,1	109,4	105,6	98,96	93,14	88,40	84,19	80,53
74	W	103,4	114,2	118,0	118,2	116,5	113,9	110,9	107,6	104,4	97,87	92,17	87,42	83,20	79,61
75	Re	114,4	125,8	129,8	129,8	127,3	124,1	120,4	116,5	112,7	105,2	98,97	93,58	88,98	85,12
76	Os	112,5	124,5	129,0	129,5	127,3	124,3	120,7	117,0	113,3	106,0	99,75	94,32	89,69	85,79
77	Ir	110,7	123,2	128,2	129,3	127,3	124,5	121,1	117,7	114,0	106,8	100,7	95,29	90,62	86,67
78	Pt	103,1	117,6	124,2	126,2	125,6	123,7	121,2	118,2	115,0	108,4	102,5	97,21	92,60	88,64

Окончание прил. 11

Атом	Z	Энергия ионов ^4He , кэВ															
		400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2400	2800	3200	3600	4000		
Au	79	109,9	122,7	128,0	129,1	127,9	125,3	122,3	118,9	115,5	110,0	104,9	99,92	95,42	91,39		
Hg	80	103,5	116,9	122,7	124,2	123,5	121,6	119,2	116,3	113,3	107,1	101,5	96,45	91,90	87,95		
Tl	81	118,4	125,0	129,5	130,0	128,4	125,8	122,9	119,6	116,4	109,8	104,0	98,82	94,11	89,99		
Pb	82	126,4	138,1	141,9	141,6	139,1	135,9	132,4	128,7	125,0	117,7	111,5	106,0	100,9	96,47		
Bi	83	124,6	136,0	139,2	138,3	135,4	131,9	128,3	124,5	120,8	113,6	107,6	102,2	97,40	93,07		
Po	84	127,3	140,0	143,0	141,8	138,4	134,6	130,6	126,5	122,6	115,2	109,0	103,6	98,76	94,38		
At	85	128,2	142,7	146,1	145,1	141,1	137,0	132,7	128,5	124,4	116,7	110,4	104,9	100,0	95,60		
Rn	86	127,7	144,4	148,7	147,7	143,5	139,2	134,7	130,3	126,0	118,1	111,7	106,0	101,2	96,72		
Fr	87	143,7	158,2	160,9	158,5	153,0	147,6	142,2	137,0	132,1	123,2	116,0	109,9	104,7	99,92		
Ra	88	155,2	167,8	169,8	166,1	160,1	154,0	147,9	142,1	136,8	127,1	119,4	112,9	107,4	102,5		
Ac	89	158,1	171,3	173,8	170,0	164,1	157,6	151,0	144,9	139,4	129,2	121,3	114,5	108,9	103,9		
Th	90	159,4	173,4	176,6	173,2	167,2	160,5	153,7	147,4	141,7	131,2	123,0	116,0	110,2	105,2		
Pa	91	153,1	166,8	170,4	168,0	162,8	156,8	150,8	145,0	139,5	129,6	121,8	115,1	109,5	104,7		
U	92	150,7	164,4	168,4	166,6	161,9	156,1	150,3	144,6	139,3	129,5	121,7	115,2	109,7	105,0		

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

**Сечение резерфордского рассеяния ионов ^4He
на ядрах различных элементов, $10^{-24} \text{ см}^2/\text{ср}$**

Элемент	Z	Угол рассеяния θ				
		179,5°	170°	160°	145°	90°
Be	4	0,053	0,055	0,058	0,069	0,297
B	5	0,097	0,098	0,104	0,122	0,482
C	6	0,147	0,150	0,159	0,185	0,704
N	7	0,214	0,218	0,230	0,266	0,974
O	8	0,291	0,297	0,312	0,360	1,285
F	9	0,384	0,390	0,410	0,471	1,642
Ne	10	0,478	0,486	0,511	0,586	2,032
Na	11	0,590	0,599	0,629	0,720	2,471
Mg	12	0,707	0,718	0,754	0,862	2,945
Al	13	0,838	0,851	0,893	1,021	3,466
Si	14	0,974	0,991	1,039	1,187	4,023
P	15	1,129	1,146	1,201	1,371	4,626
S	16	1,285	1,306	1,370	1,563	5,267
Cl	17	1,460	1,483	1,555	1,773	5,954
Ar	18	1,647	1,672	1,752	1,997	6,685
K	19	1,835	1,861	1,951	2,223	7,446
Ca	20	2,033	2,064	2,163	2,465	8,253
Sc	21	2,249	2,285	2,394	2,727	9,108
Ti	22	2,476	2,513	2,633	2,998	10,001
V	23	2,706	2,751	2,882	3,281	10,935
Cr	24	2,947	2,997	3,139	3,574	11,909
Mn	25	3,208	3,255	3,410	3,882	12,926
Fe	26	3,469	3,522	3,690	4,200	13,982
Co	27	3,741	3,802	3,983	4,533	15,082
Ni	28	4,024	4,089	4,283	4,875	16,219
Cu	29	4,330	4,392	4,601	5,235	17,404
Zn	30	4,633	4,702	4,925	5,604	18,627
Ga	31	4,947	5,026	5,264	5,989	19,894
Ge	32	5,272	5,358	5,611	6,384	21,201
As	33	5,606	5,700	5,970	6,791	22,549
Se	34	5,970	6,054	6,340	7,213	23,940
Br	35	6,326	6,416	6,720	7,644	25,370
Kr	36	6,693	6,791	7,112	8,090	26,843
Rb	37	7,070	7,175	7,514	8,547	28,357
Sr	38	7,457	7,569	7,927	9,017	29,912
Y	39	7,855	7,974	8,351	9,499	31,508
Zr	40	8,263	8,390	8,786	9,994	33,146
Nb	41	8,681	8,816	9,232	10,501	34,825
Mo	42	9,110	9,253	9,690	11,021	36,547
Tc	43	9,549	9,701	10,159	11,554	38,310
Ru	44	9,998	10,159	10,639	12,099	40,114

Элемент	Z	Угол рассеяния θ				
		179,5°	170°	160°	145°	90°
Rh	45	10,458	10,627	11,129	12,657	41,959
Pd	46	10,928	11,107	11,631	13,228	43,846
Ag	47	11,408	11,596	12,143	13,810	45,774
Cd	48	11,899	12,097	12,668	14,406	47,746
In	49	12,400	12,608	13,203	15,014	49,757
Sn	50	12,951	13,130	13,749	15,635	51,811
Sb	51	13,475	13,662	14,306	16,269	53,905
Te	52	14,008	14,205	14,875	16,916	56,043
I	53	14,552	14,757	15,452	17,572	58,219
Xe	54	15,107	15,321	16,043	18,243	60,438
Cs	55	15,671	15,894	16,643	18,926	62,698
Ba	56	16,246	16,479	17,256	19,622	65,001
La	57	16,832	17,074	17,878	20,330	67,343
Ce	58	17,427	17,678	18,512	21,050	69,728
Pr	59	18,034	18,294	19,156	21,783	72,153
Nd	60	18,650	18,920	19,812	22,529	74,621
Pm	61	19,277	19,557	20,479	23,287	77,130
Sm	62	19,914	20,205	21,157	24,058	79,681
Eu	63	20,562	20,863	21,846	24,841	82,273
Gd	64	21,220	21,532	22,547	25,638	84,907
Tb	65	21,888	22,211	23,258	26,446	87,582
Dy	66	22,567	22,901	23,980	27,267	90,299
Ho	67	23,256	23,601	24,713	28,100	93,075
Er	68	23,955	24,312	25,457	28,946	95,856
Tm	69	24,665	25,032	26,212	29,805	98,697
Yb	70	25,385	25,765	26,979	30,676	101,579
Lu	71	26,115	26,507	27,755	31,559	104,503
Hf	72	26,856	27,260	28,544	32,456	107,469
Ta	73	27,607	28,023	29,343	33,364	110,475
W	74	28,369	28,797	30,153	34,285	113,524
Re	75	29,141	29,581	30,935	35,219	116,613
Os	76	29,923	30,376	31,807	36,166	119,745
Ir	77	30,716	31,182	32,650	37,124	122,917
Pt	78	31,519	31,997	33,505	38,096	126,132
Au	79	32,332	32,824	34,370	39,079	129,387
Hg	80	33,156	33,661	35,246	40,076	132,684
Tl	81	34,096	34,509	36,134	41,085	136,023
Pb	82	34,943	35,367	37,032	42,106	139,403
Bi	83	35,801	36,235	37,942	43,140	142,824
Po	84	36,669	37,114	38,862	44,186	146,287
At	85	37,547	38,002	39,792	45,244	149,791
Rn	86	38,435	38,905	40,737	46,318	153,339
Fr	87	39,335	39,815	41,690	47,402	156,926
Ra	88	40,244	40,736	42,655	48,498	160,555
Ac	89	41,164	41,668	43,630	49,607	164,225
Th	90	42,094	42,611	44,617	50,729	167,937
Pa	91	43,035	43,562	45,614	51,863	171,689
U	92	43,986	44,527	46,623	53,010	175,485

ПРИЛОЖЕНИЕ 13**Ядерные реакции, применяемые в активационном микроанализе
для обнаружения ядер легких атомов**

Определяемое ядро	Реакция	Энергия анализирующих частиц, МэВ	Энергия регистрируемых частиц, МэВ	Сечение рассеяния, мбарн/ср	Выход, отсчет/мкКл
^2H	$^2\text{H}(d, p)^3\text{H}$	1,0	2,3	5,2	30
^2H	$^2\text{H}(^3\text{H}, p)^4\text{He}$	0,7	13,0	61	380
^3He	$^3\text{He}(d, p)^4\text{He}$	0,45	13,6	64	400
^6Li	$^6\text{Li}(d, \alpha)^4\text{He}$	0,7	9,7	6	35
^7Li	$^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$	1,5	7,7	1,5	9
^9Be	$^9\text{Be}(d, \alpha)^7\text{Li}$	0,6	4,1	1	6
^{11}B	$^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}$	0,65	5,57	0,12	0,7
		0,65	3,7	90	550
^{12}C	$^{12}\text{C}(d, p)^{13}\text{C}$	1,2	3,1	35	210
^{13}C	$^{13}\text{C}(d, p)^{14}\text{C}$	0,64	5,8	0,4	2
^{14}N	$^{14}\text{N}(d, \alpha)^{12}\text{C}$	1,5	9,9	0,6	3,6
		1,2	6,7	1,3	7,0
^{15}N	$^{15}\text{N}(p, \alpha)^{12}\text{C}$	0,8	3,9	15	90
^{16}O	$^{16}\text{O}(d, p)^{17}\text{O}$	0,9	2,4	0,74	5
		0,9	1,6	4,5	28
^{18}O	$^{18}\text{O}(p, \alpha)^{15}\text{N}$	0,73	3,4	15	90
^{19}F	$^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$	1,25	6,9	0,5	3
^{23}Na	$^{23}\text{Na}(p, \alpha)^{20}\text{Ne}$	0,592	2,238	4	25
^{31}P	$^{31}\text{P}(p, \alpha)^{28}\text{Si}$	1,514	2,734	16	100

ПРИЛОЖЕНИЕ 14

Значения нормированной функции $u(u)$ нормального распределения Гаусса

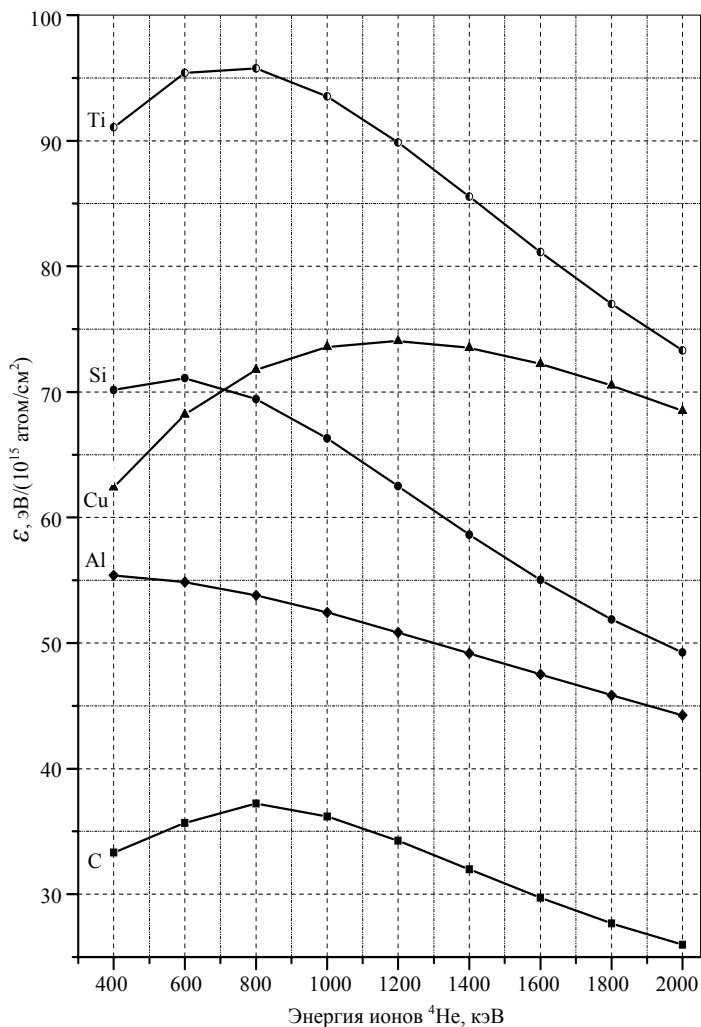
u	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,398 94	0,398 92	0,398 86	0,398 76	0,398 62	0,398 44	0,398 22	0,397 97	0,397 67	0,397 33
0,1	0,396 95	0,396 54	0,396 08	0,395 59	0,395 05	0,394 48	0,393 87	0,393 22	0,392 53	0,391 81
0,2	0,391 04	0,390 24	0,389 40	0,388 53	0,387 62	0,386 67	0,385 68	0,384 66	0,383 61	0,382 51
0,3	0,381 39	0,380 23	0,379 03	0,377 80	0,376 54	0,375 24	0,373 91	0,372 55	0,371 15	0,369 53
0,4	0,368 27	0,366 78	0,365 26	0,363 71	0,362 13	0,360 53	0,358 89	0,357 23	0,355 53	0,353 81
0,5	0,352 07	0,350 29	0,348 49	0,346 67	0,344 82	0,342 94	0,341 05	0,339 12	0,337 18	0,335 21
0,6	0,333 22	0,331 21	0,329 18	0,327 13	0,325 06	0,322 97	0,320 86	0,318 74	0,316 59	0,314 43
0,7	0,312 25	0,310 06	0,307 85	0,305 63	0,303 39	0,301 14	0,298 87	0,296 59	0,294 31	0,292 00
0,8	0,289 69	0,287 37	0,285 04	0,282 69	0,280 34	0,277 87	0,275 62	0,273 24	0,270 86	0,268 48
0,9	0,266 09	0,263 69	0,261 29	0,258 88	0,256 47	0,254 06	0,251 64	0,249 23	0,246 81	0,244 39
1,0	0,241 97	0,239 55	0,237 13	0,234 71	0,232 30	0,229 88	0,227 47	0,225 06	0,222 65	0,220 25
1,1	0,217 85	0,215 46	0,213 07	0,210 69	0,208 31	0,205 94	0,203 57	0,201 21	0,198 86	0,196 52
1,2	0,194 19	0,191 86	0,189 54	0,187 24	0,184 94	0,182 65	0,180 37	0,178 10	0,175 85	0,173 60
1,3	0,171 37	0,169 15	0,166 94	0,164 74	0,162 56	0,160 38	0,158 22	0,156 08	0,153 95	0,151 83
1,4	0,149 37	0,147 64	0,145 56	0,143 50	0,141 46	0,139 43	0,137 42	0,135 42	0,133 44	0,131 47
1,5	0,129 52	0,127 58	0,125 66	0,123 76	0,121 88	0,120 51	0,118 16	0,116 32	0,114 50	0,112 70
1,6	0,110 92	0,109 15	0,107 41	0,105 67	0,103 96	0,102 26	0,100 59	0,098 92	0,097 28	0,095 66
1,7	0,094 05	0,092 46	0,090 89	0,089 33	0,087 80	0,086 28	0,084 78	0,083 29	0,081 83	0,080 38
1,8	0,078 95	0,077 54	0,076 14	0,074 77	0,073 41	0,072 06	0,070 74	0,069 43	0,068 14	0,066 87

Окончание прил. 14

u	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1,9	0,065 62	0,064 38	0,063 16	0,061 95	0,060 77	0,059 59	0,058 44	0,057 30	0,056 18	0,055 08
2,0	0,053 99	0,052 92	0,051 86	0,050 82	0,049 80	0,048 79	0,047 80	0,046 32	0,045 86	0,044 91
2,1	0,043 98	0,043 07	0,042 17	0,041 28	0,040 41	0,039 55	0,038 71	0,037 88	0,037 06	0,036 26
2,2	0,035 47	0,034 70	0,033 94	0,033 19	0,032 46	0,031 74	0,031 03	0,030 34	0,029 65	0,028 98
2,3	0,028 33	0,027 68	0,027 05	0,026 43	0,025 82	0,025 22	0,024 63	0,024 06	0,023 49	0,022 94
2,4	0,022 39	0,021 86	0,021 34	0,020 83	0,020 33	0,019 84	0,019 36	0,018 89	0,018 42	0,017 97
2,5	0,017 53	0,017 09	0,016 67	0,016 25	0,015 85	0,015 45	0,015 06	0,014 68	0,014 31	0,013 94
2,6	0,013 58	0,013 23	0,012 89	0,012 56	0,012 33	0,011 91	0,011 60	0,011 30	0,011 00	0,010 71
2,7	0,010 42	0,010 14	0,009 87	0,009 61	0,009 35	0,009 09	0,008 85	0,008 61	0,008 37	0,008 14
2,8	0,007 92	0,007 70	0,007 48	0,007 27	0,007 07	0,006 87	0,006 68	0,006 49	0,006 31	0,006 13
2,9	0,005 95	0,005 78	0,005 62	0,005 45	0,005 30	0,005 14	0,004 99	0,004 85	0,004 71	0,004 57
u	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
3,0	0,004 43	0,003 27	0,002 38	0,001 72	0,001 23	0,000 87	0,000 61	0,000 42	0,000 29	0,000 20

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

Зависимость сечения торможения ионов ^4He от их энергии на атомах ряда элементов



ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Акцептанс 125
Ареометр 252, 253
- Вакуум 74–77, 109, 116, 123, 126–130, 199, 207, 217, 281, 299, 302
Вектор волновой 90, 91
Величины фотометрические 101, 404, 405
Взаимодействие спин-орбитальное 171, 172, 179, 180
Взаимодействия ядерные 210
Волна
 акустическая 72, 107, 229, 230
 де Бройля 72, 123, 130
 электромагнитная 71, 76–79, 89–91
Волновод
 акустический 230, 237, 242–244
 оптический 101, 102, 104
 СВЧ излучения 87–92, 105, 106, 187
Время
 задержки 30, 36
 запаздывания 36
 установления 30, 34, 36, 46
Вырождение 169, 185, 186
- Гамма (γ)-излучение 78, 79, 100, 119, 192, 227
Генератор 13, 15, 26, 31
 оптический квантовый 95–99
 СВЧ излучения 80–92
 магнетронного типа 80, 83, 84, 86, 88, 92, 104, 105, 187, 188
 эквивалентный 56, 58
- Давление 106, 142, 232, 249, 257, 399, 401
 акустическое 231
 световое 112
Демпфирование 32, 34, 42, 268
Детектор 73, 105, 119, 120, 141, 144, 145, 156, 157, 176, 187, 192, 198, 208
 полупроводниковый 158–160, 193, 213–217, 221, 223, 225, 227, 284, 287, 288
Дисперсия 77, 88, 113, 114, 118, 269
 рентгеновского излучения 192–195, 273
 угловая спектрального прибора 116, 117, 269, 271, 323
Дифракция 114, 115, 118, 119, 120, 130, 193, 236, 269, 271, 273
Дифференциатор 69, 70
Дифференцирование спектров 188, 208
Добротность 41, 42, 86
Единицы измерения 8, 9
 внесистемные 400–402
 основные СИ 8, 9, 397–398
 производные 9, 399
 фотометрических величин 101, 404–405
- Емкость электрическая 7, 12–14, 43, 44, 51, 69, 81, 85, 92, 250, 251, 262, 399
Жидкость иммерсионная 239, 242–244, 248

- Звено передаточное 21–23, 41, 49, 257, 259
- Излучение 71–73
 акустическое 71, 72, 229–231, 236, 239, 242, 243
 корпускулярное 72, 73, 76, 108, 123, 126, 130, 140, 141, 190
 переходное 120–122
 рекомбинационное 100
 Черенкова – Вавилова 120, 121
 электромагнитное 71, 74, 76–79, 97
 оптическое 79, 93, 101, 102, 106, 107, 109
 рентгеновское 78, 79, 95, 100, 101, 104, 119–122, 159, 189–198, 205, 273, 278
 сверхвысокочастотное (СВЧ) 80, 88, 104–106
 тормозное 100, 193, 194, 198
 характеристическое 79, 101, 189, 190, 192, 197, 272, 273, 406, 407
- Импеданс 12, 13, 50, 52, 54, 65, 240
- Инверсия населенностей 95, 96, 100
- Индуктивность 7, 12, 13, 44, 51, 81, 85, 92, 399
- Интегратор 69, 70, 217
- Источник
 ионный 132, 134–136, 148, 150, 217
 электронный 126, 130, 134
- Источники оптического излучения 93–100
- Каналирование 299, 307
- Кандéла 9, 398
- Квант
 действия 77
 излучения 71, 76, 77, 96, 100, 101, 107, 119, 160, 167, 177
- Квантование в атоме 165–170
- Конденсатор 13, 14, 43, 44, 69, 84, 85, 143, 155–159, 250–252, 262
- Концентратор акустический 238, 239
- Коэффициент
 замедления 87
 затухания (демпфирования) 32–34, 237, 268,
 обратной связи 64, 65
 передаточный 18, 19, 21, 24, 26–28, 66, 247, 256, 260, 261, 264
 передачи комплексный 38–40, 42, 262, 267
 полезного действия (КПД) 54, 55, 58, 59, 86, 232, 234
 преобразования 31, 67, 112
 усиления 25, 26, 63, 64, 65, 68, 81, 108, 113, 198, 255
- Критерий Рэлея 117, 118, 270, 272, 278
- Кроссовер 135
- Лазеры 95–100
- Лампа
 бегущей волны 88, 104, 105, 122
 генераторная 80, 82, 188
 обратной волны 88, 93
- Линзы
 акустические 236–239, 243, 244
 оптические 102, 111
 электронные и ионные 137–139
- Линии оптоволоконные (волоконно-оптические) 103
- Магнетон Бора 171, 174, 183
- Магнетрон 83
- Манометр 14, 249, 250, 257
- Масса 6–9, 397, 401
- Масс-спектрометр 142
 времяпролетный 151, 152

- магнитный 143
панорамный 144
радиочастотный 153, 154
циклотронный 150, 151
- Масс-фильтр
квадрупольный 145–149
монополярный 149, 150
- Металлы
жидкие 238
щелочные 176–180, 183–185
- Микроанализ
рентгеновский
 спектральный 190–194
 флуоресцентный 192, 193
 электронно-зондовый 192, 193
 эмиссионный 190
ядерный
 активационный 225–229
 мгновенно-радиационный 226
- Микроскоп
акустический 242–245
электронный 130, 193
- Момент электрона в атоме
магнитный 169, 171, 185
орбитальный 169
полный 172, 179
собственный (спин) 169, 170
- Монохроматизация излучений 73, 101, 104, 116, 123, 198
- Мультиплетность 179–182
- Оболочка электронная 79, 100, 170, 186, 189, 190, 205, 206
- Окружность Роуланда 103, 116, 119, 122, 193, 198
- Орбитали электронные 166, 167, 169, 201, 209
- Параметр прицельный 191, 287
- Первеанс 125
- Переходы электронные 79, 80, 95–98, 100, 130, 167, 168, 173, 175–182, 184–187, 189, 196, 201, 205–209
 безызлучательные 205–207
 излучательные 168, 175, 177, 184, 185, 205
- Переход электронно-дырочный (*p-n*-переход) 62, 63, 95, 99, 103, 109, 110, 158
- Пиксель ПЗС-матрицы 111
- Плотность 8, 238, 240, 253, 257, 310
 атомная 215, 221, 311, 416–419
 вероятности 165, 166
 тока 126, 129
 энергии 231, 236, 239
- Показатель
 водородный 253–255
 преломления 102, 237
- Поле
 магнитное 76, 84–86, 91, 105, 132, 133, 135, 137, 142, 143, 181, 183, 184, 187
 электрическое 76, 84–86, 91, 105, 131, 142
- Порог чувствительности 18, 19, 29, 36, 112, 142, 231, 247, 248
- Порядок задержки сигнала 30, 34, 36, 39, 40, 41
- Постоянная
 времени 30, 32, 35, 36, 112
 Планка 72, 77, 123, 161
 Ридберга 165
 Фарадея 254
- Правила отбора 177, 179, 184, 185, 189, 205
- Преобразователи
 измерительные 3, 16, 17, 30–32, 37, 39, 48–50, 60, 247, 249, 250, 255, 315

- электроакустические 232, 233, 235, 244
магнитострикционные 233, 235, 236
пьезоэлектрические 51, 70, 233–235, 239, 243
- Прибор измерительный 12, 14, 15, 17
Прибор с зарядовой связью (ПЗС-матрица) 110, 111
Призма дисперсионная 98, 101, 114, 117, 118, 269
Принцип Паули 170
Пушка электронная 100, 134, 135
- Работа выхода электрона 107, 126
Радиоспектрометр 187
Размерность физической величины 9, 397
Размер эффективный аналитической вакуумной камеры 74
Разряд газовый 76, 93–98, 127–130, 140, 174
Реакции ядерные 227, 426
Резонанс 13, 14, 41, 42, 104, 105, 114, 145, 151, 153, 154, 232
 магнитный 182, 186, 188, 210
Резонатор
 оптический 41, 98, 99, 100
 электромагнитный объемный 41, 82–87, 91, 92, 187
- Решетка
 дифракционная 98, 114–120, 236, 269–272, 323, 324
 кристаллическая 126, 202, 307
Ридберг 168
- Световод 102, 103
Связь обратная 24
 отрицательная 24, 26, 64, 67
 положительная 24, 25, 81, 98
- Сдвиг
 фазовый 37, 39
 химический 202, 203, 209, 360
 частоты 241
 энергетический 202, 204, 278
- Сечение
 взаимодействия 191, 228, 281
 ионизации атома 191
 резерфордовского рассеяния 216, 424, 425
 торможения ионов 214, 292, 420–423
 фотоионизации атомов 200, 201, 204, 278, 280–282, 412–415
- Серии спектральные излучений
 оптического 168, 177–180, 184, 185
 рентгеновского 101, 189, 190, 193, 197, 272, 274–277
- Сила
 Лоренца 131, 138, 150
 оптическая 400
 электродвижущая (ЭДС) 12, 19, 43, 51, 52, 54, 56, 58, 60, 70, 106, 110, 236, 253
- Система
 замедляющая 87, 88, 105, 106
 физических величин 8
- Спектрометрия
 резерфордовского обратного рассеяния 159, 193, 210–224, 287
 рентгеновского излучения 119, 120, 159
 электронного парамагнитного резонанса 186–188
 ядерного магнитного резонанса 188
- Спектроскопия
 атомная оптическая 175, 176
 ожё-электронная 173, 205–210
 рентгеновская фотоэлектронная 173, 195–204, 278–287, 326

Спин

атома 180, 181, 188
электрона 169–171, 187, 188

Способность

разрешающая 20, 116–118, 142,
147–149, 223, 269, 270, 323
тормозная 215, 229

Степени вакуума 75

Схема

функциональная 51, 59, 72
эквивалентная 51, 52, 55, 56,
66–70

Температура 7, 9, 14, 17, 51, 64,
106, 109, 159, 248, 254

Теорема

Лиувилля 124, 125
об эквивалентном генераторе 56
отсчетов 46

Термометр 17, 248, 249

Транзистор 60–63, 67

Триод вакуумный 60–62, 70, 81

Трубка рентгеновская 100

Умножитель электронный 107, 108,
152

динодный 108
канальный 108, 198, 208
микроканальный 108, 109

Уравнение

акустической волны 230
волновое 90, 91
основное измерений 8
Шрёдингера 130, 161
временное 161, 162
стационарное 162, 163
Эйнштейна для фотоэффекта
107, 195
электромагнитной волны 76, 90
Уравнения Максвелла 84, 85

Уровень

акустического давления 231
вакуума 196, 206
интенсивности звука 232
Фёрми 196, 206
энергетический атома 97, 172,
178, 182, 183, 185, 280

Усилители 26

операционные 65–70
электрических сигналов 25, 26,
49, 59–65, 140, 144, 145, 150,
187, 235, 254

Условие

Брэгга – Вульфа 101, 120, 193, 198
синхронизма электронов и волн 87

Фактор

кинематический резерфорд-
ского рассеяния 212, 213, 217,
220, 287, 289, 291, 416–419
магнитного расщепления (g-фак-
тор) 183, 188
тормозного сечения 215, 221, 224,
287, 292, 296, 300, 302, 310, 313,
361

Фотодиод 107, 109, 112

Фоторезистор 107, 109, 112

Функция

волновая 161–165
передаточная 21, 30, 40, 44–46,
64, 65, 265–267
переходная 21, 34, 35, 37
преобразования 16–18, 45, 247

Характеристика

амплитудно-частотная 31, 38,
269
импульсная переходная 30, 36, 37
передаточная 21, 30, 40, 44–46,
64, 65, 265–267

- переходная 21, 34, 35, 37
фазово-частотная 30, 37–39, 45, 268
- Частота 399
 граничная 46, 61
 комплексная 38, 43
 резонансная 41, 81, 85, 86, 92, 104, 144, 232, 234
 собственная 32, 37, 41, 267
 циклотронная 133, 150, 151
- Число
 волновое 77, 236
 квантовое
 главное 165, 167, 169, 177
 магнитное орбитальное 166, 169, 185
 магнитное спиновое 171
 орбитальное 166, 169, 177
 полного момента 172, 183
 спиновое 170
 Кнудсена 74, 75
- Чувствительность 18, 19, 20, 49, 112, 142, 144, 147, 150, 158, 159, 193, 200, 203, 207–210, 216, 222, 224, 227, 228, 232–235, 247–255
- Шкала электромагнитного излучения 78
- Эмиссия электронов 126, 127, 140, 197, 281
- Эмиттанс 124, 125
- Энергия
 ионизации 128, 129, 168
 связи электронов в атоме 191, 195–197, 199–204, 206–278, 280–285, 360, 408–411
 Фёрми 196, 206
- Энергоанализаторы
 полупроводниковые (детекторы)
 диффузионно-дрейфовые 159, 160, 193
 поверхностно-барьерные 158, 159, 217, 223, 287, 294
 электростатические
 бездисперсионные 154, 155, 207
 дисперсионные 154–158, 198, 207
- Эффект
 Доплера 240, 241
 Зеемана 182–185
 Пашена – Бака 185
 Штарка 185, 186
- Эффективность
 ионизации молекул 129
 преобразования 233
 мощности 49–54
 напряжения 58

ЛИТЕРАТУРА

1. Харт, Х. Введение в измерительную технику / Х. Харт. – М.: Мир, 1999.
2. Основы метрологии и электрические измерения / Б. Я. Авдеев [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Атамалян, Э. Т. Приборы и методы измерения электрических величин / Э. Т. Атамалян. – М.: Высш. шк., 1982.
4. Датчики измерительных систем: в 2 т. / Ж. Аш [и др.]. – М.: Мир, 1992. – 2 т.
5. Дирнли, Дж. Полупроводниковые счетчики ядерных излучений / Дж. Дирнли, Д. Нортроп. – М.: Мир, 1966.
6. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений: ГОСТ 8.009-84. – Введ. 01.01.86. – М.: Стандартинформ, 2006. – 27 с.
7. Гутько, В. И. Активационный анализ: курс лекций / В. И. Гутько. – Минск: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2008.
8. Джонс, М. Х. Электроника – практический курс / М. Х. Джонс. – М.: Постмаркет, 1999.
9. Комар, Е. Г. Основы ускорительной техники / Е. Г. Комар. – М.: Атомиздат, 1975.
10. Куликовский, К. Л. Методы и средства измерений / К. Л. Куликовский, В. Я. Купер. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
11. Жарский, И. М. Физические методы исследования в неорганической химии / И. М. Жарский, Г. И. Новиков. – М.: Высш. шк., 1988.
12. Измерения электрических и неэлектрических величин / Н. Н. Евтихийев [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
13. Измерения в промышленности: справочник / под ред. П. Профоса. – М.: Металлургия, 1990.
14. Ингрэм, Д. Электронный парамагнитный резонанс в биологии / Д. Ингрэм. – М.: Мир, 1972.
15. Информационно-измерительная техника и технологии / под ред. Г. Г. Раннева. – М.: Высш. шк., 2002.
16. Клаассен, К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К. Б. Клаассен. – М.: Постмаркет, 2000.
17. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи / Е. С. Левшина, В. П. Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.

18. Матвеев, А. Н. Атомная физика / А. Н. Матвеев. – М.: Высш. шк., 1989.
19. Метрология и радиоизмерения / под ред. В. И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003.
20. Отто, М. Современные методы исследований в аналитической химии: в 2 т. / М. Отто. – М.: Техносфера, 2003. – 2 т.
21. Поплавский, В. В. Основы измерений физических величин: учеб. пособие / В. В. Поплавский. – Минск: БГТУ, 2005.
22. Поплавский, В. В. Измерения физических величин. Практикум: учеб. пособие / В. В. Поплавский. – Минск: БГТУ, 2006.
23. Ревин, В. Т. Преобразователи и преобразование измерительной информации: в 5 ч. / В. Т. Ревин. – Минск: БГУИР, 2002–2005. – 5 ч.
24. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения: РМГ 29-99. – Введ. 01.01.2001. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: ИПК «Издательство стандартов», 2000. – 46 с.
25. Спектор, С. А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений / С. А. Спектор. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
26. Фелдман, Л. Основы анализа поверхности и тонких пленок / Л. Фелдман, Д. Майер. – М.: Мир, 1989.
27. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1983.
28. Филипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филипс, Р. Харбор. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.
29. Электроника. Энциклопедический словарь / гл. ред. В. Г. Колесников. – М.: Советская энциклопедия, 1991.
30. Электрорадиоизмерения / под ред. А. С. Сигова. – М.: Форум-Инфра-М, 2004.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
--------------------------	----------

Часть 1. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	6
--	----------

1.1. Предмет и базовые понятия дисциплины	6
1.1.1. Базовые понятия	6
1.1.2. Единицы измерения физических величин	8
1.1.3. Методы измерений	10
1.1.4. Средства измерений	14
1.2. Измерение как процесс преобразования сигналов измерительной информации	15
1.2.1. Сигналы измерительной информации	15
1.2.2. Измерительные преобразователи. Статические характеристики измерительных преобразователей и средств измерений	16
1.2.3. Блок-схемы преобразования сигналов в средствах измерений	21
1.2.4. Расчет статических характеристик средств измерений на основе блок-схем преобразования сигналов	26
1.2.5. Динамические измерения физических величин	29
1.2.6. Временные динамические характеристики измерительных преобразователей и средств измерений	32
1.2.7. Частотные динамические характеристики измерительных преобразователей и средств измерений	37
1.3. Измерительные системы и их основные элементы	47
1.3.1. Согласование измерительных преобразователей электрических сигналов	49
1.3.2. Усилители сигналов измерительной информации	59
1.3.3. Операционные усилители и преобразование сигналов измерительной информации на их основе	65

Часть 2. ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА ВЕЩЕСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЙ	71
---	-----------

2.1. Измерения с применением электромагнитного и корпускулярного излучений	74
--	----

ОГЛАВЛЕНИЕ	439
2.2. Принципы преобразований электромагнитного излучения	76
2.2.1. Природа и основные характеристики электромагнитного излучения	76
2.2.2. Получение и формирование потоков электромагнитного излучения	80
2.2.2.1. Сверхвысокочастотное электромагнитное излучение	80
2.2.2.2. Электромагнитное излучение оптического диапазона и характеристическое рентгеновское излучение	93
2.2.3. Регистрация и спектрометрия электромагнитного излучения	104
2.3. Принципы преобразований корпускулярного излучения ...	123
2.3.1. Природа и основные характеристики корпускулярного излучения	123
2.3.2. Получение и формирование потоков корпускулярного излучения	126
2.3.3. Регистрация и спектрометрия корпускулярного излучения	140
2.4. Измерения состава веществ, основанные на исследовании электронной структуры атомов	161
2.4.1. Электронная структура атомов. Излучение электромагнитной энергии атомами	161
2.4.2. Основы атомной оптической спектроскопии	174
2.4.3. Многоэлектронные атомы. Мультиплетность энергетических уровней атомов и атомных спектров	176
2.4.4. Взаимодействие атомов с электромагнитным полем. Расщепление энергетических уровней атомов и магнитный резонанс	182
2.4.5. Характеристическое рентгеновское излучение. Рентгеновский спектральный микроанализ	189
2.4.6. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия	195
2.4.7. Оже-электронная спектроскопия	205
2.5. Ядерно-физические измерения состава веществ	210
2.5.1. Спектрометрия резерфордовского обратного рассеяния	211
2.5.1.1. Физические основы спектрометрии резерфордовского рассеяния	211
2.5.1.2. Измерение состава веществ методом резерфордовского обратного рассеяния	217
2.5.2. Основы ядерного активационного микроанализа	225
2.6. Основы акустических измерений	229

2.6.1. Природа и основные характеристики акустического излучения	229
2.6.2. Принципы преобразований акустического излучения	232
2.6.2.1. Источники и приемники акустического излучения	232
2.6.2.2. Формирование акустических полей и потоков акустического излучения	236
2.6.3. Принципы измерений с применением акустического излучения	240

Часть 3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ 247

3.1. Методика выполнения заданий	247
3.1.1. Построение физико-математических моделей и определение статических характеристик измерительных преобразователей	247
3.1.2. Построение блок-схем преобразования сигналов в средствах измерений	255
3.1.3. Определение статических и динамических характеристик средств измерений на основе блок-схем сигналов	259
3.1.4. Определение характеристик оптических спектральных приборов	269
3.1.5. Моделирование распределений интенсивности рентгеновских спектральных линий	272
3.1.6. Определение состава веществ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии	278
3.1.7. Определение состава веществ методом спектрометрии Резерфордского обратного рассеяния	287
3.2. Контрольные задания	315
3.2.1. Построение физико-математических моделей и блок-схем преобразования сигналов измерительной информации; расчет характеристик измерительных преобразователей на основе блок-схем	315
3.2.2. Определение характеристик оптических спектральных приборов	323
3.2.3. Моделирование распределений интенсивности спектральных линий характеристического рентгеновского излучения	326
3.2.4. Определение элементного состава поверхности образцов по фотоэлектронным спектрам	326
3.2.5. Определение состава поверхности образцов по спектрам Резерфордского обратного рассеяния	361

ОГЛАВЛЕНИЕ	441
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	397
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	399
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	400
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	401
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	403
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	404
ПРИЛОЖЕНИЕ 7	406
ПРИЛОЖЕНИЕ 8	408
ПРИЛОЖЕНИЕ 9	412
ПРИЛОЖЕНИЕ 10	416
ПРИЛОЖЕНИЕ 11	420
ПРИЛОЖЕНИЕ 12	424
ПРИЛОЖЕНИЕ 13	426
ПРИЛОЖЕНИЕ 14	427
ПРИЛОЖЕНИЕ 15	429
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	430
ЛИТЕРАТУРА	436

Учебное издание

Поплавский Василий Владимирович

ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Учебник

Редактор *Т. Е. Самсанович*

Компьютерная верстка *С. С. Белявская*

Корректор *Т. Е. Самсанович*

Подписано в печать 25.04.2014. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 25,6. Уч.-изд. л. 26,5.

Тираж 200 экз. Заказ 141.

Издатель и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014.

ЛП № 02330/12 от 30.12.2013.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.

Переплетно-брошюровочные процессы произведены
в ОАО «Полиграфкомбинат им. Я. Коласа».

Ул. Корженевского, 20, 220024, г. Минск. Заказ .